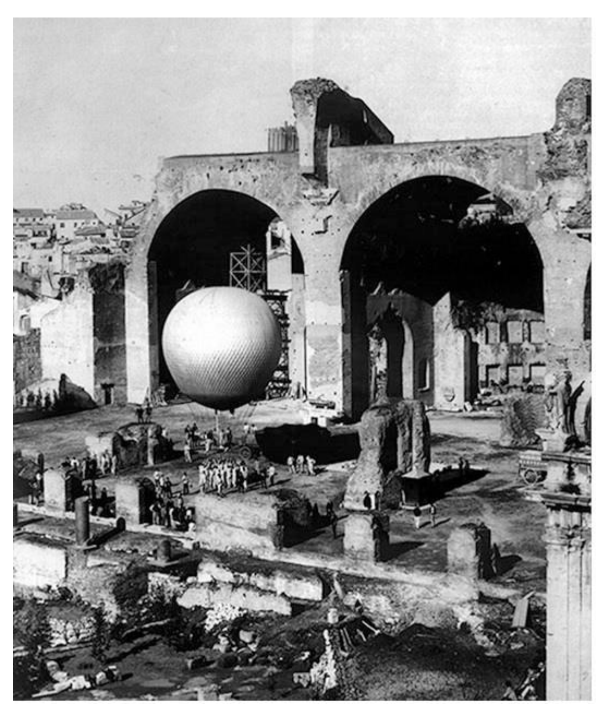
تطبيقات الاستشعار عن بعد في علم الآثار




تأليف: ستيفانو كامبانا

ترجمة: ياسر مهدي

مراجعة وتحرير: عاطف معتمد



© 2019

تطبيقات الاستشعار عن بعد في علم الآثار

تأليف:

ستيفانو كامبانا [1]

ترجمة:

ياسر مهدي [2]

مراجعة وتحرير:

عاطف معتمد[3]

(١) أستاذ بكلية الكلاسيكيات ومعهد ماكدونالد للبحوث الآثارية، جامعة كامبريدج، كامبريدج، المملكة المتحدة. والمؤلف في الأصل يعمل في مختبر علم آثار المشهد العام الطبيعي الثقافي والاستشعار عن بعد، قسم التاريخ والتراث الثقافي، جامعة سيينا، إيطاليا.

(٢) كان "ياسر مهدي" يعمل في وزارة الآثار العراقية في مدينة إربيل، وقد تلقى دورة تدريبية على يد مؤلف هذا البحث، وسمح له ذلك بترجمة النص إلى اللغة العربية، غير أن المنية وافته بعد إتمام الترجمة وقبل أن يرى هذا البحث منشورا، ويهدي المؤلف هذا العمل إلى روحه.

(٣) أستاذ في علم الجغرافيا، كلية الآداب، جامعة القاهرة.

من إصدارات بيت الجغرافيا

العنوان: **تطبيقات الاستشعار عن بعد في علم الآثار**

المؤلف: **ستيفانو كامبانا**

المترجم: **ياسر مهدي**

المراجع: **عاطف معتمد**

عدد الصفحات: ٤٦

الطبعة: **الأولى**

"**بيت الجغرافيا**" جهة بحثية غير هادفة للربح تعنى بالبحث والترجمة، مقرها القاهرة. يديرها د. عاطف معتمد.

الموقع على الإنترنت: **https://geo-house.info**

تمهيد

يمكن تعريف الاستشعار عن بعد[١] بأنه علم تحديد ومراقبة وتفسير وقياس الأشياء والأسطح من دون اتصال مباشر معها. واتفق الباحثون في علم الآثار على أن ثمة طريقتين مختلفتين لتعريف استخدام الاستشعار عن بعد في مجالهم البحثي:

(أ) أنه تقنية الحصول على معلومات عن الأشياء من خلال تحليل البيانات التي جمعت بواسطة المستشعرات Sensors (كاميرات، ماسحات ضوئية، أنظمة تصوير بالرادار، إلخ.) غير المتصلة ماديا بشكل مباشر مع الأشياء قيد التحري. وغالباً ما تُستخدم الأجهزة المحمولة في الفضاء والمحمولة جواً لتحقيق ذلك. ومن وجهة النظر هذه فإن الاستشعار عن بعد يختلف عن الاستشعار الأرضي الذي تلامس فيه الأجهزة سطح الأرض فيزيقيا، على نحو ما نجد في الأجهزة الأرضية مثل الرادار المخترق لسطح الأرض (Ground Penetrating Radar GPR). (انظر لمزيد من التفاصيل Doneus et al., 2011)

(ب) يفضل فريق آخر من علماء الآثار تعريف الاستشعار عن بعد بأنه تلك الطريقة غير المدمرة للمشهد الأثري المطمور ودون العبث بالدليل المخفي للحياة في الماضي. هذه الطرق لا تتضمن فقط مستشعرات محمولة في الفضاء ومحمولة جواً (مستشعرات تصوير جوي تقليدية أو رقمية، ماسحات ضوئية متعددة الأطياف أو كثيرة الأطياف، إلخ.) بل تشمل أيضا أجهزة جيوفيزيائية أرضية (وهناك العديد منها في مجال الجيوفيزياء، وقياس المغناطيسية، والرادار المخترق لسطح الأرض، والمقاومة الكهربائية، وغير ذلك). ويندرج وفق هذا التعريف الاستشعار عن بعد لما تحت سطح البحر. ووفقا لهذا التعريف يتضمن الاستشعار عن بعد تقنيات واسعة مثل جمع قطع أثرية من السطح أو المسح الحقلي (مشياً على الأقدام). أي أننا وفق هذا التعريف نضم أية طريقة تساعدنا على مراقبة الدليل المدفون دون التأثير على سلسلة التتابع الطبقي الباقية عبر التاريخ (Powlesland, 2010).

أولا: تطور استخدام الاستشعار عن بعد في علم الآثار

لوقت طويل، قام الاستشعار عن بعد في بحوث الآثار بشكل كامل على التصوير الجوي مصحوبا برسم الخرائط وتفسير الصور الناتجة. كانت التطبيقات الأولى قاصرة على توثيق التنقيبات الأثرية. ويمكن تتبع التطورات الزمنية التي شهدتها هذه التقنية وفقا للمراحل البارزة التالية:

١- نهاية القرن التاسع عشر ومطلع القرن العشرين

شهد عام ١٨٧٤ الحدث الأول في التسجيل الفوتوغرافي الجوي على يد ستولز وأندرياس، اللذين قاما بتصوير مدينة بيرسبوليس الأثرية في إيران (Stolze, 1882). ولقد لعب الإيطاليون دورا بارزا في التاريخ المبكر لعلم الآثار

[١] بالإنجليزية: Remote Sensing؛ بالفرنسية: Te´le´de´tection ؛ بالألمانية Fernerkundung؛ بالإسبانية:Percepcion Remota.

الجوي في القارة الأوروبية، بداية مع الصور المشهورة لموقع ساحة الرومان Roman Forum في مدينة روما، والتي التقطها جياكومو بوني في عام ١٨٩٩م (شكل ١).

وخلال الفترة من ١٩٠٢ و١٩٠٨ جرت تجارب مشابهة تناولت تصوير مناطق أثرية قرب روما على طول نهر تايبر ثم حول مدن فينيسيا وأوستيا وبومبي. (Boni, 1900; Piccarreta and Ceraudo, 2000).

وقد جرت مبادرات مماثلة في بلدان أوربية أخرى، كما في بريطانيا عام ١٩٠٦م حين أجريت تجارب لاستخدام منطاد عسكري غير مقيد بالأرض، التقط من خلاله الملازم "شارب" أول صور جوية لنصب صخرية عظيمة للموقع الأثري الشهير ستونهينج Stonehenge (Bewley, 2002)

في تلك المرحلة كانت المنصة الوحيدة المتوفرة للتصوير الجوي هي منطاد مملوء بالهواء الحار أو الغاز. وفي هذه المرحلة المبكرة، عرض التصوير الجوي منظور جديد في تسجيل المعالم المعروفة جيداً، كان الهدف توثيقي بحت ليحصل على تمثيل طبق الأصل للموقع أو المعالم محل البحث.

واستمر استخدام المناطيد في ثلاثينيات القرن العشرين لتصوير التنقيبات المشهورة في موقع بِسكوبن Biskupin في بولندا (Bewley, 2002). ولا تزال المناطيد ومجموعة متنوعة من الأنظمة المعتمدة على الطائرات الورقية مستخدمة إلى الوقت الحاضر في التصوير الجوي لموقع واحد أو منطقة صغيرة.

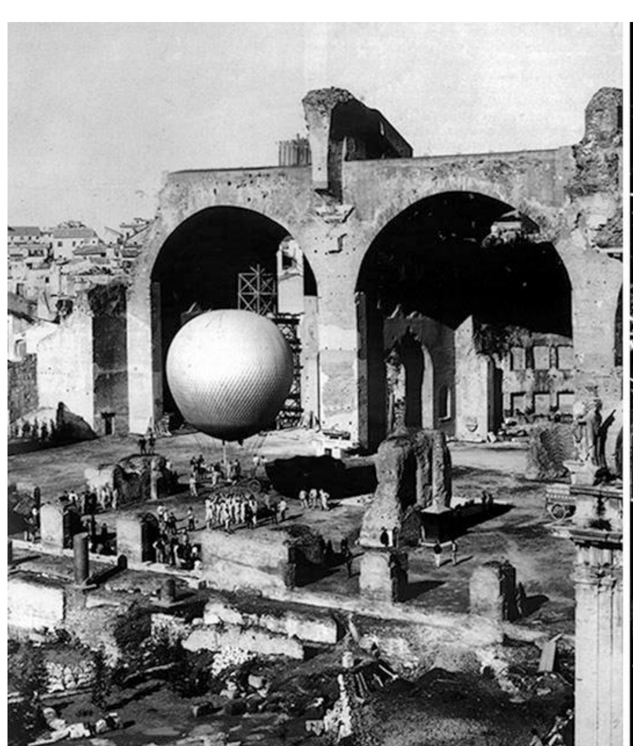
٢- الحرب العالمية الأولى (١٩١٤-١٩١٨م)

أثرت هذه الحرب بشكل مهم في تطوير نوع جديد من المنصات، الطائرات التي تعمل بالطاقة. جنباً الى جنب مع التقدم المتعلق بالكاميرات والأفلام، وأصبح التصوير الجوي المعتمد على الطائرات مصدرا جديدا لكل أنظمة استخبارات الأطراف المتحاربة. وإذا كان عدد الصور الجوية الملتقطة قبل عام ١٩١٤م يُعد بالعشرات، فإنه مع نهاية الحرب تمكنت القوات الجوية الملكية البريطانية وحدها من التقاط حوالي نصف مليون صورة (Rączkowski, 2001).

قدمت الحرب أيضاً عدداً من الطيارين والمراقبين في التصوير الجوي للجهد الأثاري. نذكر منهم في بريطانيا على سبيل المثال "كروفورد" فضلا عن رائد أخر (عمل لحساب بريطانيا في الشرق الأوسط) هو المغترب الفرنسي أنطوان بوديبارد. يعد هذان الرجلان أباء التصوير الجوي وتطبيقاته في دراسات مشهد الطبيعي والثقافي لسطح الأرض.

في عام ١٩٢٨م، نشر كروفورد مع ألكسندر كيلر (Crawford and Keiller.1928) بحثا بعنوان "ويسيكس [1] من الجو Wessex from the Air"، أوضح فيه الإمكانية الهائلة للتصوير الجوي والمبادئ الرئيسة لهذه التقنية. ولمزيد من الأبحاث عن المراحل المبكرة واللاحقة لتطور التصوير الجوي الآثاري انظر Deuel (1969) and Barber (2011).

(١) ويسيكس (Wessex): منطقة تاريخية أنجلوسكسونية في جنوب بريطانيا. (المترجم).





شكل (١): استخدم "جياكومو بوني" بالون هواء مقيد بالأرض لرصد الحفائر الأثرية في موقع بالساحة الرومانية في مدينة روما ، (المصدر: Guaitoli,2003)

٣-الحرب العالمية الثانية (١٩٣٩-١٩٤٥م)

جلبت هذه الحرب معها تطورات تقنية ومنهجية في كل من المنصات الجوية (الطائرات) والكاميرات، وشهدت تطورات جديدة لتقنيات الاستشعار عن بعد. فعلى سبيل المثال بدأ الالتفات لتكنولوجيا الرادار الذي لم يكن مستعملاً في السياقات الأثارية من قبل.

يعود الفضل في تحقيق حلقة الوصل بين مرحلة "الريادة" في فترة ما قبل الحرب وبدايات التقدم في ما بعد الحرب في المرحلة "التفسيرية" إلى جون برادفورد، الضابط السابق في استخبارات القوات الجوية الملكية البريطانية. كان برادفورد قد انخرط مباشرة في غضون الأشهر اللاحقة لتوقف الأعمال الحربية منكبا على التصوير الجوي ورسم الخرائط الأثارية لمنطقة سهل تافوليري Tavoliere الواقع حَولَ مدينة فوجيا[١].

هنالك، قام هو وضابط زميله في القوة الجوية الملكية (اسمه بيتر ويليامز هانط) باكتشاف دليل استثنائي لمشاهد طبيعية ثقافية غير معروفة مسبقاً، تتكون من مئات الأسيجة التي تعود للعصر الحجري الحديث مع أطلال رومانية، مؤلفة أساسا من بيوت كبيرة ومزارع تأسست وفقا للنظام الروماني القديم لتقسيم الأراضي Centuriation.

شمل التصوير أيضا بلدة "مفقودة" ونظام حقول زراعية يعود للعصور الوسطى، وتلال، وشوارع، وطرق غير معبدة، وأنواع مختلفة من المستوطنات. مع ذلك كانت النقلة الحقيقية في جهود برادفورد في صدور كتابه لاحقا في عام ١٩٥٧ بعنوان "مشاهد الأرض القديمة" وهو ما عد أعظم إنجازله بسبب الرسالة التي نقلها حول إمكانات التصوير الجوي في الدراسات الأثارية والمشاهد الطبيعية الثقافية، ليس فقط في إيطاليا بل عبر مساحات واسعة من أوربا.

٤- التطورات منذ منتصف القرن العشرين

في خمسينيات القرن العشرين، أصبحت متوفرة منصات جديدة لتصوير الأرض من خلال استخدام الأقمار الصناعية والطائرات التي تحلق على ارتفاعات عالية ومستشعرات جديدة اعتمدت أنظمة تصوير الأشعة تحت الحمراء (القريبة، المتوسطة، والحرارية)، جنبًا إلى جنب مع أجهزة جمع بيانات موجات مايكرويف وبيانات متعددة الأطياف. ولابد من التنويه هنا إلى اتساع وجهات النظر المُقدمة بواسطة هذه المستشعرات الجديدة والأقمار الصناعية المُبكرة.

في هذا الصدد نذكر جهود إيفلين برويت – وهي عالمة في الجغرافيا عملت سابقا في مكتب البحوث البحرية في الولايات المتحدة الأمريكية – والتي صكت في خمسينيات القرن العشرين مصطلحا جديدا هو "الاستشعار عن بعد"، للتعبير عن تلك الوسيلة الجديدة وأضافت بهذا المصطلح للقاموس التقني مفردة جديدة مهمة. وتم الترويج لهذا

(١) فوجيا Foggia مدينة في جنوبي إيطاليا (المترجم).

المصطلح الجديد في سلسلة من الندوات عُقدت في مختبرات Willow Run التابعة لجامعة ميتشجين، وحظي المصطلح بقبول فوري واسع الانتشار.

بالرغم من أن المصطلح أصله حديث نسبياً، لكن البشر استخدموا هذه التقنية منذ فجر التاريخ. كل مرة نستشعر محيطنا بواسطة النظام الذي يربط الاستقبال والتحليل بين العين والدماغ، نحن نُحدد حجم، شكل، ولون الأشياء عن بعد بواسطة جمع وتحليل الضوء المرئي المنعكس. كل هذا يتم غريزياً دون اتصال مباشر مع الأشياء التي نراقبها.

بطريقة مماثلة، تستخدم الأفاعي مستشعرات حرارية خاصة لتدرك انطباعات عن البيئة المحيطة، تحدد الأفاعي إشارات الحرارة الطبيعية بطريقة خاملة بنفس طريقة مكتشف الأشعة تحت الحمراء الموجودة بالقمر الصناعي الذي يصور سطح الأرض بالاعتماد على حرارتها المنبعثة.

تستخدم الخفافيش صدى الصوت في حركتها وطيرانها لتحديد الفرائس، وبطريقة تشبه أنظمة الرادار ترسل الخفافيش الصوت بطريقة موجات راديوية ثم تستقبل انعكاساتها لتستشعر عن بعد مجموعة متنوعة من الأشياء والأسطح البعيدة.

على الرغم من التحسينات العظيمة في أنظمة الاستشعار عن بعد خلال وبعد الحرب العالمية الثانية، إلا أن المجتمع الأثاري استمر بالاعتماد كلياً على التصوير الجوي وتفسير الصور الناتجة على الأقل على مدى ثلاث عقود لاحقة. وبعدما كانت التقنيات المستخدمة في أحدث أنواع أنظمة الاستشعار عن بعد محجوزة للأغراض العسكرية أو لأهداف أخرى وغير مسموح باستخدامها لعلماء الآثار، أصبح استخدام الاستشعار عن بعد أوسع في علم الآثار بدء من أواخر ثمانينيات وبداية تسعينيات القرن العشرين.

ولقد شهدت هذه الفترة تطبيق تقنيات مبتكرة مثل:

- تحليل صور الأقمار الصناعية
- استخدام المستشعرات المحمولة جواً لجمع بيانات متعددة الأطياف وفائقة الأطياف
- التصوير اعتمادا على بيانات الرادار
- استخدام مسوح الأساليب الجيوفيزيائية الأرضية مثل القياس المغناطيسي، الأشعة المقطعية للمقاومة الكهربائية (Electrical Resistivity Tomography ERT)، والرادار المخترق سطح الأرض (Ground Penetrating Radar GPR).

ومع تراكم الخبرة عبر العقود والتقدم التقني وازدياد فهم التعقيد الاستثنائي للسياقات الأثارية صار من الممكن دمج تقنيات الاستشعار عن بعد مع علم الأركيوميتري (Archaeometry)[١] والأساليب التقليدية مثل التنقيبات

(١) Archaeometry علم آثاري يعتمد تطبيق تقنيات تحليل المواد الأثرية من أجل تحديد عمرها الزمني. (المترجم)

والمسح الميداني. بهذه الوسائل صار في متناول الآثاريين تحقيق طفرة نوعية في جودة البيانات التي يتمناها كل باحث منهم.

وهناك عامل واحد لعب دورا محوريا في مستوى التقدم الذي بلغه على الاستشعار عن بعد الآثاري خلال هذه الفترة الأخيرة وأقصد به "دمج وإدارة مدى واسع من البيانات والمعلومات ذات الصلة" عبر تقنية نظم المعلومات الجغرافية (Geographic Information System GIS).

في الوقت الذي قام فيه المهندسون وعلماء الفيزياء وعلماء الحاسبات بتحسين نوعية وفعالية النظم المنفردة، وأجهزة الاستشعار، والتقنيات وتصميم أنواع جديدة كلياً من هذه الأجهزة، كان علماء الآثار من جانبهم يقومون - من خلال تطبيق نظام المعلومات الجغرافية – بالبحث فيما وراء الصورة المنفردة أو مجموعة بيانات لإنتاج ورسم خرائط ذات اندماجات أوسع، وبالتالي تفسيرات أشمل، وبهذه الطريقة جمعوا تنوعا واسعا من البيانات.

ولقد وفر تقسيم المعلومات على شكل طبقات من البيانات وتراكبها في نظام المعلومات الجغرافي وسيلة جوهرية للبحث عن وتطوير طرق جديدة وأكثر تكاملاً لتمثيل وتفسير أدلة الماضي.

وفي الوقت الحاضر يتزايد استخدام الاستشعار عن بعد في علم الآثار سريعاً في الجامعات، والبعض منها أنشأت أقساما متخصصة ومعاهد للمرحلة الجامعية، والدراسات العليا، وما بعد الدكتوراه، وأيضاً برامج بحث متخصصة. كما أن هناك نزوعا في المعاهد التي تهدف إلى حماية وصيانة التراث الأثري، على نحو ما نجد مثلا في إنجلترا التي تم فيها رسم خرائط للأدلة المعتمدة على التصوير الجوي.

وهناك أدوار أخرى إيجابية لتطور هذه الأساليب والتقنيات تقوم بها المنظمات الدولية، مثل مجموعة أبحاث علم الآثار الجوي (Aerial Archaeology Research Group AARG) وموقعها الإلكتروني: (http://www.univie.ac.at/aarg)، وكذلك الجمعية الدولية للبحث الآثاري وموقعها الإلكتروني: (http://www.brad.ac.uk/archsci/archprospection).

ثانيا: مبادئ الاستشعار عن بعد

قد يظهر الاستشعار عن بعد المعالم الأثرية بشكل مباشر، سواء كانت أطلالها باقية (أو ربما تعرضت للتعرية بشكل كبير) ويبدو ذلك في شكل التغيرات في سمات سطح الأرض. وحينما لا تكون المعالم الأثرية موجودة على سطح الأرض، يمكن الكشف عنها بطريقة غير مباشرة من خلال ملاحظة التغيرات في لون وارتفاع الغطاء النباتي. وقد تظهر هذه المعالم كتقطعات مرئية في التربة العارية أو تنكشف بواسطة الزراعة أو بفعل عوامل التعرية والتآكل، كما يمكن الاستدلال عليها أيضا من خلال إشارات سطح الأرض الأخرى، أو في هيئة وسطية كتقطعات مايكرومورفولوجية[١] حين تكون المعالم مطمورة (Wilson, 2000).

---

(١) المايكرومورفولجي هو دراسة شكل وهيكل الكائنات الحية على المستوى المجهري. (المترجم)

عندما تكون المواقع الأثرية واضحة على سطح الأرض، يستطيع الاستشعار عن بعد أن يلعب دورا خاصا في توثيق شكلها العام والأجزاء المكونة من مكان مراقبة مرتفع، كما يسمح ذلك أيضا برسم سريع للخرائط بمساعدة برامج حاسوبية مصممة لذلك (Remondino, 2011). وهناك مواقع عديدة بالطبع يمكن بدلاً من ذلك أن ترسم من الأرض مباشرة، لكن استخدام بيانات الاستشعار عن بعد تكون قيمة للغاية لرسم خرائط المواقع والمعالم التي - لسبب أو لآخر - لا يمكن الوصول إليها عبر المسح الحقلي.

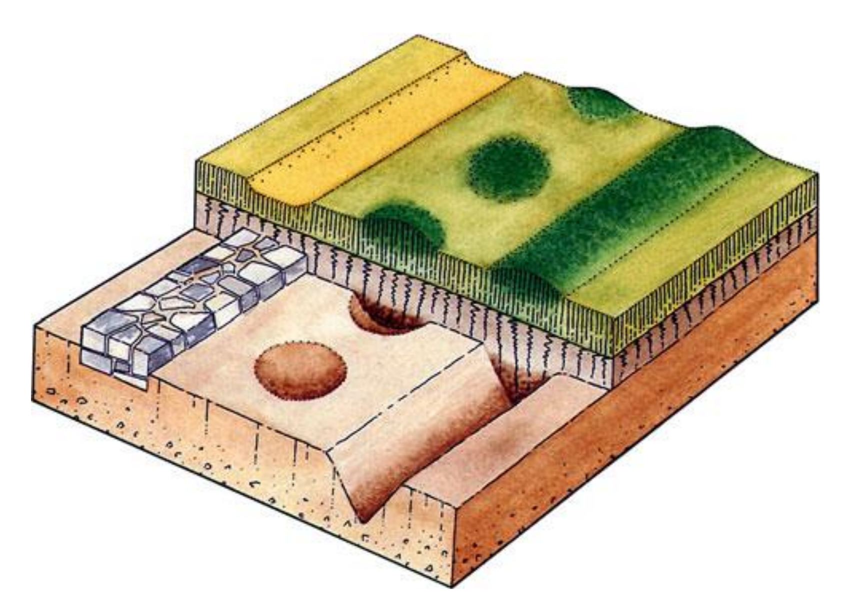
ويكتسب التحديد غير المباشر للدليل الأثري أهمية خاصة للكشف عن المعالم والمواقع الأثرية غير المعروفة سابقاً. والمبدأ الرئيس في هذا السياق هو قدرة التقنيات (مثل التصوير الجوي وتقنية تحديد الضوء والمدى "الليدار LiDAR"[1] والرادار والتصوير بالأشعة تحت الحمراء الحرارية) على لتمييز الدليل الذي يوفر إشارات غير مباشرة في التربة الطبيعية عن النشاط البشري في الماضي. لهذا الغرض طورت عدة منهجيات لتحديد التغيرات البيئية النسبية من أجل تمييز المعالم الأثرية الممثلة بواسطة أدلة غير مباشرة، تقوم هذه الأدلة على الاستفادة بعدد من الظواهر المترابطة (Musson, 1994) والتي تتضمن التالي:

١- التغيرات في لون وارتفاع وكثافة المحاصيل الزراعية أو غطاء نباتي آخر. لقد وصفت هذه التغيرات على أنها علامات النباتات أو تعرف أكثر شيوعا باسم علامات المحاصيل Cropmarks. تمثل هذه العلامات واحدة من أكثر الأدوات المدهشة للكشف عن المواقع غير المسجلة سابقاً. تظهر علامات المحاصيل كاختلافات في ارتفاع ولون المحاصيل التي تحت ضغط نقص في الماء أو بعض المواد الغذائية الأخرى. ويحتمل أن يبدو ذلك أكثر في الضوء والتربة الجافة جيداً، أو فوق الصخور اللينة والتي لها قابلية النفاذ، أو في الحصى. نتيجة لذلك، يتباين رصد هذه العلامات على مستوى الدول والأقاليم والمناطق المحلية. تظهر علامات المحاصيل في أغلب الأحيان في موسم نضوج الحبوب، خصوصاً عندما يكون الطقس جافا. في هذه الظروف، يمكن أن تُشاهد علامات المحاصيل في الفترة من ٢-٨ أسابيع خلال المراحل الأخيرة من النضوج أو لفترات أقصر في المراحل المبكرة من النمو (شكل ٢). خلال السنوات الرطبة، قد لا تكون المحاصيل تحت ضغط كاف لتكوين علامات المحاصيل، حتى وإن شُوهدت بانتظام في الماضي. وقد تظهر علامات المحاصيل في أوقات أخرى من السنة في تشكيلة واسعة من الغطاء النباتي، مثل: الحبوب، الحشائش، محاصيل جذرية، محاصيل العلف الخضراء، أعشاب، ونباتات مزهرة متنوعة.

٢- علامات تظهر بشكل متباين في التربة العارية يكشفها النشاط الزراعي أو عوامل التعرية، عادةً تعرف هذه الاختلافات باسم علامات التربة Soil Marks. تظهر هذه العلامات كتغيرات في لون وبنية أو رطوبة سطح التربة، وتعكس معالم ما تحت سطح الأرض، مثل خنادق أو أساسيات جدار. وقد تظهر العلامات لفترات زمنية قصيرة فقط عندما تجف التربة أو تنعكس عليها أشعة الشمس بطرق معينة. العائق الرئيس في تحديد العلامات يقع في تسجيل تلك العلامات في الوقت المناسب، خصوصاً عندما تكون التربة رطبة بعد حرثها آليا أو بالمحراث اليدوي.

---

(١) LiDAR (Light Detection And Ranging): طريقة مسح لقياس المسافة بإطلاق شعاع من الليزر. (المترجم)



شكل (٢) علامات المحاصيل : تبدي المحاصيل التي تنمو فوق حفرة عميقة أو خندق مدفون نضجا أكبر لأنها تنمو في تربة أعمق أكثر تغذية. في المقابل يكون نمو المحاصيل واهنا ونضجه يبدأ قبل الأوان في تلك الترابات الضحلة فوق الجدران المطمورة أو رواسب أخرى غير منتظمة. وتنشأ عن الخنادق والحفر المدفونة علامات خضراء في المحصول الأصفر. في المقابل تتسبب الجدران والمعالم المدفونة في إعاقة نمو المحصول فتنشأ عنها علامات صفراء في المحصول الأخضر. في المحاصيل الناضجة بالفعل يمكن أن يستمر كلا النوعين، فنجد لوناً "أصفر فوق اللون الأصفر".

المصدر: Royal Commission on the Ancient and Historical Monuments of Wales

٣-تأثير الظل والضوء، ينتج ما يوصف أحياناً بعلامات الظلShadow Marks. في هذه الحالة، يستخدم الظل وشدة الإضاءة لتأكيد المعالم الفيزيائية التي لاتزال موجودة، لكن ربما تكون على الأغلب غير مرئية على سطح الأرض، مثل الجدران الترابية للحقول التي تكون بالكاد قابلة للكشف والتي تعود الى عصور ما قبل التاريخ أو قبور تلالية تآكلت بشكل كبير. ولقد استفاد المختصون في التصوير الجوي الآثاري من أشعة الشمس المنخفضة في الشتاء أو من ضوء الصباح الباكر أو الضوء الضعيف قبل الغروب في أوقات أخرى من السنة. تساعد تقنية الضوء المنخفض أو الظل بشكل فعال لا سيما في المناطق المرتفعة حيث تسود نسبة أقل من التآكل بواسطة الحرث الحديث. وقد تكون هذه الطريقة مفيدة أيضا في المناطق المنخفضة، من خلال إلقاء أنماط طفيفة جداً من التباين الطوبوغرافي في التضاريس بواسطة تتابع ثنائية الضوء والظل، بهذه الطريقة يبدو الشكل العام للمعالم الأثرية أكثر وضوحاً.

٤-يَنشأ الصقيع، الثلج، والفيضان حالات خاصة يمكن أن توفر فرص جيدة للتصوير الجوي الآثاري. فعلى سبيل المثال، يمكن لغطاء رقيق من الثلج أن يخفي اللون المشتت ويوفر ظروف ممتازة للتصوير منخفض الإضاءة. كما أن بوسع الذوبان المختلف للصقيع بواسطة أشعة الشمس أو الرياح أو استمرار الجليد والثلج فوق الخنادق المدفونة أن يكشف أيضاً عن معالم تحت سطح الأرض غير متوقعة. كما أن الفيضان ربما يعيد تحديد مجاري الأنهار القديمة ويوضح موقع الطرق أو المزارع بطريقة ما كانت لتتم إلا بمسح ميداني مضنٍ. وينتج عن الجفاف لفترات طويلة علامات محاصيل في الأراضي العشبية التي لم تظهر استجابة من قبل ونادرا ما تتوفر في أوقات أخرى.

ثالثا: عوامل مهمة في الاستشعار عن بعد

لا يعتمد نجاح الاستشعار عن بعد في التطبيقات الأثارية على تاريخ التقاط البيانات فحسب، بل أيضاً على نوعية الأدلة التي جمعت. ولدينا على الأقل أربعة عوامل لدقة هذه البيانات وهي (Lillesand and Kiefer, 1994):

- الدقة المكانية (Spatial)
- الدقة الطيفية (Spectral)
- الدقة الراديومترية (الإشعاعية Radiometric)
- الدقة الزمنية (Temporal).

تتعلق الدقة المكانية (Spatial Resolution) بمستوى التفاصيل المرئية في الصورة، وتعتمد على قوة تصميم المستشعر والمسافة بين المستشعر والهدف. وتعتمد الدقة المكانية في الصورة الرقمية على مساحة سطح الأرض التي هي ممثلة بواسطة كل بكسل Pixel مسجل. وقد يقابل كل بكسل مساحة من سطح الأرض ذات مدى مكاني يتراوح بين٣٠ م^{٢} و ١ م^{٢}، وقد تصل مساحته في بعض التطبيقات إلى أقل من ٥ سم^{٢}. وتمثل الدقة المكانية واحدة من أكثر العوامل أهمية للاستشعار عن بعد الأثاري لما توفره من تحديد المعالم الأثرية بشكل فعّال.

وتشير الدقة الطيفية (Spectral Resolution) إلى كل من: المدى الطيفي range width وعدد الوحدات القياسية التي تحدد قوة المستشعر على تسجيل البيانات. تبدأ الفترة الطيفية المحدودة من الطيف الكهرومغناطيسي[1] المرئي للعين البشرية بأطوال موجية من ٣٩٠ إلى ٩٥٠ نانومتر وتتوسع بشكل كبير عن طريق استخدام أجهزة الاستشعار الكهروضوئية. هذه الزيادة في القدرة على تسجيل مناطق مختلفة من الطيف الكهرومغناطيسي تدل على رغبة لاستغلال كامل إمكانات هذه المستعشرات، والقدرة على فصل المعلومات على طبقات مختلفة (حِزم طيفية) لإنتاج صور متعددة الأطياف (Multispectral Images) (من ٢-١٠ حزمة طيفية) أو فائقة العدد الطيفي Hyperspectral Images (من ١٠-٢٠٠ حزمة طيفية) وتلعب هذه الجودة دورا مهما في تحديد المعالم الأثرية.

أما الدقة الراديومترية أو الإشعاعية (Radiometric Resolution) فتشير الى عدد الكثافات الإشعاعية المختلفة التي يمكن للمستشعر التفريق بينها. وعادة ما تتألف هذه الأطياف من ٨ الى ١٤ بِت (Bit)[2] لكل حزمة، وبالتالي تقابل ٢٦٥ مستوى من تدرجات اللون الرمادي وتصل الى ١٦٣٨٤ درجة من مستويات التدرج اللوني.

وتتعلق الدقة الزمنية (Temporal resolution) بمعدل تكرار التصوير من الأجهزة المحولة جوا سواء الأقمار الصناعية، الطائرات، أو أية منصة رصد أخرى. وهذا النوع من الدقة وثيق الصلة بالدراسات الآثارية، إذ يتيح في بعض الحالات مراقبة المنظر الثقافي الطبيعي العام أو تغيرات الموقع على مر الزمن (تقاس بالأيام، سنوات، أو حتى عقود). فالبيانات "التاريخية" من الاستشعار عن بعد (مثل الصور الجوية المبكرة أو البيانات من طلائع أجيال الأقمار الصناعية) يمكن أن تكون ذات فائدة كبيرة للغاية في توفير المصدر الوحيد المتاح للمعلومات حول تغيرات المشهد الثقافي الطبيعي على المدى الزمني الطويل.

فحص الصورة والتفسير الآثاري

تضم الصور الملتقطة بأنظمة الاستشعار عن بعد سجلا مفصلا عن معالم سطح الأرض في الماضي والحاضر. في عملية التفسير يتفحص عالم الآثار الصور بطريقة منتظمة كما أنه يستمد معلومات داعمة من مصادر أخرى ذات صلة، مثل الخرائط وتقارير العمل الميداني. التفسير المشتق من هذه الدراسة يهدف الى "قراءة" وفهم الظواهر والمعالم الظاهرة في كلا المشهدين الحديث والقديم وملاحظة الفرق بينهما. وأساس التفسير السليم هنا هو فهم آمن لعوامل المشهد الثقافي الطبيعي الحديث في المنطقة المعنية. ومن خلال تحديد النمط الحالي، والأجزاء المكونة له، يمكن لفت الانتباه الى العناصر "غير المتطابقة" التي قد تشكل جزء من المعالم السابقة سواء في شكل مواقع، أو أنماط مشهد الأرض الثقافي الطبيعي. ومن خلال الفحص الأولي المنهجي يمكننا التعرف على خصائص أساسية متنوعة، مثل الشكل، الحجم، النمط، درجة اللون، البنية، الظل، الموقع الطبوغرافي، والترابط (Lillesand and Kiefer, 1994).

أهداف وميزات الاستشعار عن بعد الآثاري

(١) الطيف الكهرومغناطيسي: هو مدى الأطوال الموجية أو الترددات التي يمتد عليها الإشعاع الكهرومغناطيسي. (المترجم).
(٢) بت (Bit): هي أصغر وحدة قياس لحجم البيانات الرقمية المحوسبة (المترجم).

عادةً ما يقارن علم الآثار واستعانته بالاستشعار عن بعد بالطب وممارسات التشخيص الطبية. ومثل تطور الصورة السريرية للمريض، فإن فهم العملية الآثارية، يتحقق من خلال فهم التاريخ الشخصي والعائلي وخلال القصة التطورية لعلم الآثار نفسه. ولدينا هنا إشارة مهمة إلى علم الرموز والإشارات "السيموطيقا" (Semiotics) وهي دراسة وتحليل الظواهر والإشارات المرئية من الخارج التي نجدها موازية للمسح الميداني (مشياً على الأقدام) وجمع عينات من السطح. المرحلة الأخيرة من التشخيص الطبي تتضمن التحليل باستخدام الأدوات (الطب المعتمد على الأدلة) من خلال استخدام الفحوصات المخبرية، وهذه المرحلة موازية لطرق البحث الأركيومتري (Archaeometry). وعلاة على ذلك تستخدم أدوات أو معدات خاصة، مثل الموجات فوق الصوتية وعلم الإشعاعات (Radiology)[1]، وهذه تشبه في المعنى الحقيقي أجهزة الاستشعار عن بعد المستخدمة في علم الآثار.

هذا ويمكن تحديدها الأهداف الرئيسية للاستشعار عن بعد في علم الآثار فيما يلي:

١-توثيق السياقات الأثرية بتفصيل موضوعي وكبير.

٢-اكتساب معلومات عن الطبقات المدفونة وأحياناً غير المرئية تماماً من مستوى سطح الأرض مع وصف شبه تفصيلي وقياسات مترية وهندسية لرصد الخصائص الفيزيائية/الكيميائية للمعالم الموجودة تحت سطح الأرض.

٣-التسجيل المتوازن والممثل للأدلة الأثرية الإيجابية والسلبية.

٤-المراقبة، من المقياس الكبير الى التفصيلي الصغير، مع رصد تغيرات مشهد الأرض الثقافي الطبيعي بما يسمح بتطوير سياسات تخطيط وصيانة لها.

٥-رسم الخرائط للبيانات الأثرية، التفسير، وإعادة البناء، وذلك من خلال استخدام نظم المعلومات الجغرافية التي تستطيع أن تواجه التعقيد الكامن للمشهد الثقافي الطبيعي للماضي وما يضمه من مواقع أثرية.

نقاط الضعف الرئيسية

يخضع الاستشعار عن بعد في علم الآثار لعدد من القيود. ففي حالة المستشعرات البصرية العاملة في الجزء المرئي من الطيف الكهرومغناطيسي، نجد أن مفهوم المصادفة Serendipity هو العائق الأكبر. فالمصادفة هي أكتشاف شيء غير مطلوب وغير متوقع، لكن ليس بالصدفة وحدها. النتيجة الإيجابية يجب أن تكون نتيجة تجارب مخطط لها، تجري في إطار البحث العلمي المنهجي. في حالة الاستشعار عن بعد الآثاري، يتأثر استرداد المعلومات بالمصادفة بعدد من العوامل: علم التربة، المناخ، أنماط الزراعة، النباتات أو المحاصيل الناضجة، التطور التاريخي لمشهد الأرض الثقافي الطبيعي، إلخ. يفهم علماء الآثار من الناحية النظرية المبادئ العلمية التي تجعل المعالم الأثرية تحت الأرض مرئية على السطح لكنهم لا يستطيعون السيطرة على العوامل البيئية والأنثروبولوجية التي تؤثر على

(١) علم الإشعاعات: هو العلم الذي يتعامل مع الأشعة السينية وإشعاعات عالية الطاقة، خصوصاً استخدام هذا الإشعاع لتشخيص وعلاج الأمراض. (المترجم)

طريقة تعديل المعالم الأثرية تحت سطح مظهر التربة أو الغطاء النباتي للكشف عن وجودها. نتيجة لذلك فإن توزيع المعالم الأثرية من خلال الاستشعار عن بعد ما هو إلا انعكاس لهذه العوامل المؤثرة (أنظر الشكل ٣).

وتعتمد هذه التقنيات نسبيا على أجزاء خارج الجزء المرئي من الطيف الكهرومغناطيسي، مثل الأشعة تحت الحمراء (سواء القريبة، المتوسطة، أو الحرارية)، الأشعة الرادارية، المسح الليزري ثلاثي الأبعاد LiDAR، وأساليب البحث الجيوفيزيائي، ويمكن أن تتأثر أيضا بمبدأ المصادفة الذي أشرنا إليه. وفي العموم لا تعد التقنيات السابقة أساسية في البحث الأثري فدورها مكمل ومساعد.

أنظمة وأساليب الاستشعار عن بعد الآثاري

لدينا قدر هائل من أنظمة الاستشعار عن بعد والأساليب المتعلقة بتحليل البيانات. وعادة ما يتم تصنيفها وفقاً لحوامل المستعشرات (قمر صناعي، طائرات جوية، مستشعرات مثبتة على الأرض، الخ.) ونوع المستشعر المستخدم (بصري، حراري، تحديد الضوء والمدى، رادار، مغناطيسي، الخ.).

صور الأقمار الصناعية

في عام ١٩٥٧م، تمكن الاتحاد السوفيتي السابق من وضع أول قمر صناعي (قمر Sputnik 1) في مدار حول الأرض وبدء عصر الاستشعار عن بعد بالأقمار الصناعية. أما أولى أقمار مراقبة الرصد الجوي للأرض بشكل منتظم فكان القمر الصناعي تيروس-١ (TIORS-1) الذي أطلق في عام ١٩٦٠م من قبل برنامج الفضاء الأمريكي. ثم بدأ عصر الصور الجوية (التصوير الفوتوغرامتري Photogrammetry)[١] الملتقطةبالأقمار الصناعية في عام ١٩٦٠م مع برنامج الاستطلاع العسكري (كورونا CORONA)، وهو مشروع أمريكي بالمثل.

ثم بدأت الدراسات تستخدم صور الأقمار الصناعية أكثر في رسم الخرائط والقياس بحلول عام ١٩٦٢م مع تصميم وإطلاق أجيال جديدة من مشروع كورونا وخاصة القمر كورونا كيهول ٤ CORONA KH-4.

بدأ استخدام الأقمار الصناعية في الأغراض غير العسكرية (المدنية) مع ظهور لاندسات-١(Landsat-1) في عام ١٩٧٢م. ثم تتابعت عدة أنظمة أقمار صناعية للاستشعار مشابهة لقمر لاندسات مثل القمر الفرنسي سبوت (SPOT HRV) والأنظمة الهندية (لِس LISS).

في هذه الفترة، كانت التطبيقات في علم الآثار مقيدة بالدقة الهندسية الضعيفة (حوالي ٢٠متر في كل بِكسل) وكان استخدام الصور رهن المختبرات رفيعة المستوى في البحث العلمي. في السياقات الآثارية كانت صور الأقمار الصناعية المتوفرة في هذا الوقت تستخدم بشكل رئيسي لتمييز خلفية البيئة وأنماط الزراعة، أو لتكوين خرائط للمناطق التي لم تكن خرائطها متوفرة، كما هو الحال في أجزاء من أسيا الوسطى، الشرق الأدنى، أفريقيا، وأمريكا الوسطى.

---

(١) فوتوغرامتري هو علم القياسات من الصور الفوتوغرافية، وخاصة لاستعادة المواقع الدقيقة من نقاط السطح. (المترجم)



شكل (٣) يعرض الجزء الأعلى على اليسار لصورة جوية مائلة تظهر حقلا كبيرا لزراعة الحبوب، تبدو فيه علامات المحاصيل مرئية بشكل واضح (التفاصيل أعلاه على الجانب الأيمن)، فُسرت هذه المعالم على أنها تمثل بيتا أثريا من العصر الروماني. التقطت الصور في عام ٢٠٠٥م خلال موسم النضج حين تكون علامات المحاصيل مرئية بشكل أفضل للبحث الأثري. أما الجانب الأسفل على اليسار واليمين فيوضح صور جوية مائلة لنفس المنطقة التقطت بعد عامين (٢٠٠٧م) خلال موسم ظهور علامات المحاصيل، لكن لم يكن عامل المصادفة serendipity هنا مواتيا. نتيجة لذلك، لا توجد معالم مرئية في التصوير الجوي. وهذا مثال نموذجي يظهر كيف أن توزيع المعالم الأثرية يدين في جزء منه بالفضل للفحص القائم على اكتشاف أثر المصادفة الذي تظهر معه أو تختفي المواقع الأثرية.



شكل (٤): يبين الجزء العلوي صورا من مسيرة مكوك التصوير بالرادار في الرحلة الثانية للمكوك كولومبيا في عام ١٩٨١م ، وفيه تظهر صور الرادار (SIR-A) على قمر لاندسات متعدد الأطياف مغطيا منطقة في جنوب غرب مصر حيث يختفي أسفل غطاء رقيق من الرمال (سمكه من صفر الى عدة أمتار) مشهد طبيعي لأنهار قديمة مطمورة، وتستطيع الحزمة L الرادارية (ذات الطول الموجي البالغ ٢٣سم) اختراق ٢متر من الرمال الجافة فتظهر أسفلها أنظمة مجاري متكاملة مدفونة (نقلا عن:R.G. Bloom, JPL-NASA).

ومن الأحداث المثيرة الأخرى في تاريخ الاستشعار عن بعد: إطلاق أنظمة رادار الى الفضاء، زيادة الأقمار الصناعية الخاصة بالطقس، الاستعانة بسلسلة من الأجهزة المتخصصة للتعامل مع المراقبة البيئية أو الحرارية ومستشعرات الموجات الصغيرة الخاملة، فضلا عن الأساليب الأكثر حداثة مثل المستشعرات فائقة الأطياف.

فعلى سبيل المثال، جذبت صور الرادار اهتمام وسائل الإعلام العالمية بعد اكتشاف المدينة المفقودة أوبار (Ubar) في جنوبي عُمان، كما يطلق على مسمى "أنهار الرادار" (الشكل ٤) على قيعان الأنهار القديمة المطمورة تحت رمال الصحراء.

ومنذ مطلع القرن الحادي العشرين، أصبح الاستخدام الآثاري لبيانات الأقمار الصناعية أكثر انتشاراً وأوسع شيوعاً. وعلى الرغم من طبيعة العمل الأثري المهم الذي ينفق فيه وقت كبير الذي يقوم به نفر قليل من العلماء والآثاريين منذ ١٩٧٠م، إلا أن التغير الملموس في تطبيقات الاستشعار عن بعد في علم الآثار كان التحسن الكبير في الدقة الراديومترية أو الإشعاعية (Radiometric Resolution) لصور الأقمار الصناعية.

بدأ تطور صور الأقمار الصناعية عالية الدقة جداً (High Resolution Satellite Imagery HRSI) مع ظهور أولى الأقمار الصناعية التجارية. كان أول أطلاق ناجح لقمر صناعي تجاري المعروف باسم إيكونوس-٢ (IKONOS-2) قد بدأ في عام ١٩٩٩م. وأعقب ذلك قمر كويكبيرد (Quickbird) في ٢٠٠١م، وقمر أوربفيو (OrbView-3) في عام ٢٠٠٣م، ولاحقاً قمر كومبسات-٢ (Kompsat-2)،ثم قمر إريوس بي-١ (EROS-B1)، وقمر ريسورس – دك-١ (Resource-DK-1) في ٢٠٠٦م.

وشهدت السنوات الخمسة عشر الماضية تحسنا في دقة الصور الملتقطة بالأقمار الصناعية من ٢٠م لكل بكسل واحد (قمر SPOT) إلى ٤٠سم لكل بكسل (قمر GeoEye-1 الذي أطلق في أيلول ٢٠٠٨م) أي بزيادة جودة مقدارها ٢٥٠٠ مرة في القدرة لتحديد الأجسام الصغيرة (الشكل ٥).

ومع ذلك، ورغم تزايد فرص التطبيقات الآثارية بشكل ملموس، إلا أنه ما تزال هناك عدة عقبات وقيود، أهمها:

- الجدولة: توجد صعوبات (و تكاليف) في جدولة التقاط الصور لتتزامن مع الشروط الآثارية الملائمة أو الوقت من السنة. إذ يتطلب العمل الأثري مرونة أكثر في تخطيط التقاط الصورة خلال نافذة الوقت المناسب، على سبيل المثال، خلال موسم علامات المحاصيل في الموقع محل الدراسة.
- الدقة الطيفية HRSI، ما زلنا مقيدين إلى اليوم باستخدام ثلاث حزم فقط في الجزء المرئي من الطيف وحزمة رابعة فقط في الأشعة تحت الحمراء القريبة.
- الدقة الهندسية: على النقيض من القيود السابقة، هناك إمكانات جديدة هائلة، في مقدمتها أحدث قمر صناعي GeoEye-2 الذي أعلنت شركة Digital Globe في ٣١ تموز ٢٠١٤م بأنه سيتم تغيير اسمه إلى WorldView-4 ويتوقع أن يتيح المرئيات التي التقطها من ٢٠١٣م فصاعداً، كما أن "الجيل التالي" من الأقمار الصناعية التجارية – والتي خطط لإطلاقها خلال عام ٢٠١٦م – سوف تكون لديها دقة تصوير رمادية (بانكروماتية Panchromatic) مقدارها ٣٠سم ودقة مكانية متعددة الأطياف

مقدارها ١.٢م. ومع ذلك ما زال العديد من علماء الآثاريين يشعرون بأنهم بحاجة إلى شيء أقرب إلى ٥سم أو دقة أعلى يقدمها التصوير الجوي التقليدي.

كملاحظة أخيرة، تجدر الإشارة إلى أن المتابع غير المتخصص لما تضمه أرفف مكتبة عن علم الآثار، خصوصاً في الولايات المتحدة، قد يعتقد أن الاستشعار عن بعد بالأقمار الصناعية هو التقنية الرئيسية للبحث الآثاري. لكن هذا ليس صحيحا. إذ أنه وفقا لما تشير إليه دراسة Powlesland فإنه في مقابل كل موضع أثري تم التعرف عليه من الصور الفضائية، هناك ألف موضع تم التعرف عليه من خلال التصوير الجوي.

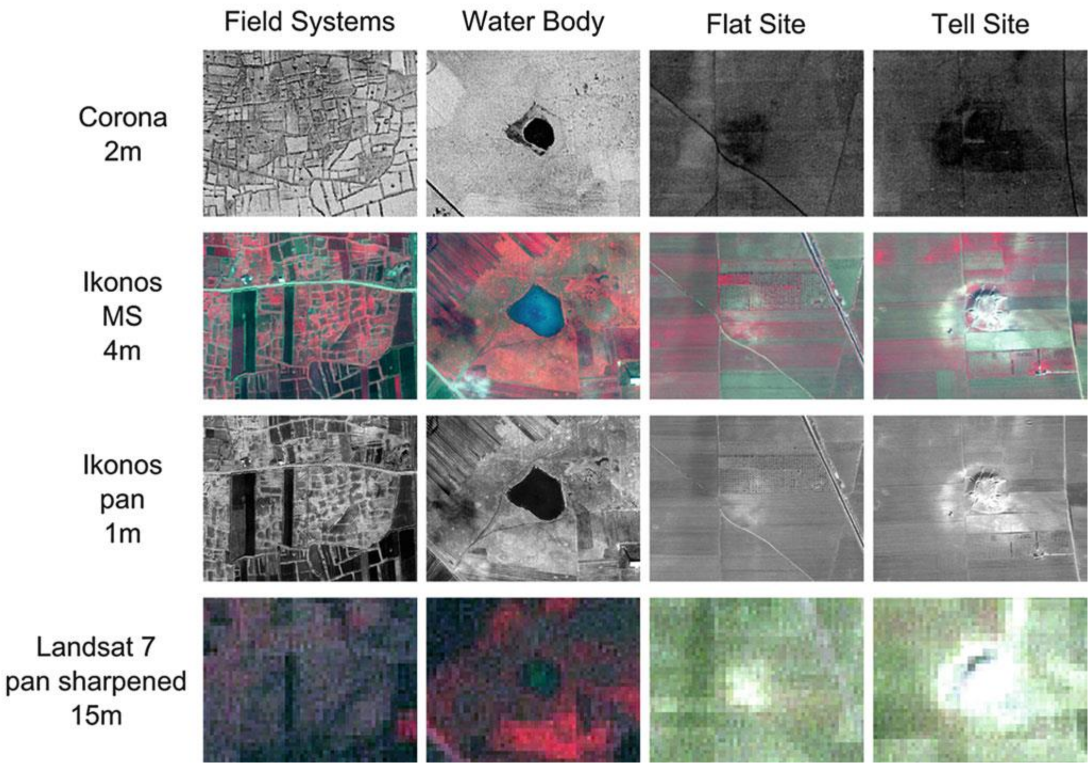
في أوربا على سبيل المثال، شاع استخدام التصوير الجوي لمراقبة وتوثيق مشهد الأرض الثقافي الطبيعي الأثري لأكثر من قرن من الزمن، وهذه الطريقة تبقى الى حد بعيد أكبر مساهم للسجل الأثري واسع المدى. على سبيل المثال، تشير الأوراق المقدمة في الاجتماعات السنوية لمجموعة أبحاث علم الآثار الجوي إلى أنه من الممكن أن ترى التأثير الهائل الذي أحدثه كل من المسح الجوي والتصوير الجوي في البلدان الأوروبية، وذلك حتى وقوع التغيرات السياسية في أوائل تسعينات القرن العشرين والتي فرضت قيودا جعلت من شبه المستحيل التصوير من طائرات خفيفة.

وكان هناك استخدام واسع النطاق لصور الأقمار الصناعية في غياب البيانات المتاحة ذات المستوى الأعلى من تقنيات الاستشعار عن بعد الأقل تكلفة والأكثر فعالية مثل التصوير الجوي، البحث الجيوفيزيائي، المسح الليزري المحمول جواً، والتقاط البيانات متعددة الأطياف أو فائقة الأطياف. مع ذلك، من المهم أن ندرك أن مساهمة صور الأقمار الصناعية كبيرة ولكنها غير مؤكدة في كثير من الأحيان هي تغطيتها جميع أنحاء العالم، وبالتالي:

١-تأثير هذه الصور على تحليل المناطق الجغرافية الكبيرة.

٢-المقياس الذي يمكن إدراجه ضمن دراسات "مشهد الأرض الثقافي الطبيعي".

ولعله لم يدر بخلد أحد قبل سنوات قليلة إمكانية الجمع بين صور الأقمار الصناعية ونظم المعلومات الجغرافية في "الكرة الأرضية الافتراضية" مثل برنامج Google Earth الذي يساعدنا في مراقبة مناطق واسعة جداً من كوكب الأرض على مستوى عال من التفاصيل.



شكل (٥): مقارنة مستشعرات الأقمار الصناعية وفقا للدقة المكانية والزمنية :
كورونا ١٩٦٩م، إيكونوس ٢٠٠٢م، ولاندسات ١٩٩٩م (نقلا عن: Beck, 2011) .



شكل (٦): صورة جورية رأسية التقطت في عام ١٩٥٥م في ريف مدينة فوجيا Foggia بجنوب إيطاليا. يظهر التصوير معالم واضحة موائل بشرية تعود لفترة العصر الحجري الحديث، وتلول كانت عامرة بالاستقرار البشري في العصور الوسطى، ونسق من الحقول الزراعية (نقلا عن: Guaitoli, 2003) .

أجهزة الاستشعار المحمولة بالطائرات

إذا نحينا جانباً، ولو مؤقتا، التصوير من الطائرات الخفيفة، سنجد أن الاستشعار عن بعد الجوي على مستوياته التجارية والأكثر تطوراً يستخدم مستشعرات موجهة لأسفل أو ذات مستشعرات جانبية محمولة على طائرة متخصصة وذلك للحصول على صور عمودية أو مائلة لسطح الأرض. الفائدة الأساسية، مقارنة بأقمار الاستشعار، هو قدرة هذه الطائرات على إنجاز دقة مكانية عالية ما بين ٢٠ سم إلى ٥ سم لكل بكسل. وتكمن المساوئ في تغطية جوية لمساحات أًصغر وكلفة أعلى لكل وحدة من سطح الأرض. هذا النوع من الاستشعار عن بعد ليس فعالا من حيث التكلفة في رسم الخرائط للمناطق الكبيرة جداً، مثل قارات كاملة، على الرغم من أنه استخدم (بشكل تراكمي على مدى زمني طويل) لرسم خرائط لبلدان أو أقاليم بكاملها. لكن عادة ما تكون مهمات التصوير الجوي مكرسة لإنتاج عمليات مفردة (نادراً ما تكون ذات تكرارية) في الوقت الذي نجد فيه الأقمار الصناعية لمراقبة الأرض لها إمكانية مراقبة حقيقية مستمرة ومتكررة لسطح الكوكب. وعادة في المستشعرات المحمولة في الطائرات يُستخدم كلا النوعين (الرقمي والتناظري). كما أن أنواع الاستشعار الأخرى المشهورة بها الأقمار الصناعية مثل التصوير متعدد الأطياف وفائق الأطياف، والتصوير الراداري (Synthetic Aperture Radar SAR)، والتصوير الليزري ثلاثي الأبعاد (LiDAR) تستخدم جميعها أيضا في المستشعرات المحمولة بالطائرات.

أنواع التصوير الجوي

يستخدم علماء الآثار نوعين من التصوير الجوي: التصوير "المائل"، أي المشاهد المنظورية، والتصوير "العمودي" الذي يصوب مباشرة إلى الأسفل نحو سطح الأرض. يؤخذ التصوير العمودي (وهو تناظري في الأصل، وإن أصبح الآن رقميا بشكل متزايد) بواسطة كاميرات متطورة من طائرات مجهزة خصيصاً لأغراض المسح ورسم الخرائط. التكلفة المالية لهذا النوع عالية نسبياً، ونادرا ما يستطيع الآثاريون تحمل تكاليف استخدامها لأغراض بحوثهم، لذلك، يستعين علماء الآثار بشكل كثيف بالمجموعات الهائلة من الصور الجوية الموجودة في الأرشيفات (أنظر الشكل ٦ و٧). خلال الحرب العالمية الثانية، تقريباً أخذت ٥٠ مليون صور جوية. وفي أوربا الحديثة، تجمع الخدمات العامة ربما ملايين من الصور سنوياً.

النوع الثاني من الصور (الصور المائلة) عادة ما يؤخذ بواسطة علماء الآثار أنفسهم، من النافذة المفتوحة لطائرة صغيرة مستأجرة من مطار محلي (أو نادراً يملكها علماء الآثار أنفسهم أو من قبل أرباب العمل). الكاميرات وأفلام الكاميرات بسيطة للغاية وغير غالية الثمن. وإذا كان التصوير العمودي يسجل كامل المشهد الثقافي الطبيعي، فإن التصوير المائل انتقائي ويغطي فقط ما يقرر المصور أن له أهمية أثرية (أنظر الشكل ٨). وعادة لا يصور أو يسجل ما يفشل في رؤيته أو فهمه. لذلك فإن التصوير العمود يملك قيمة خاصة في دراسة مشهد الأرض الثقافي الطبيعي الكامل، أو من المستوطنات في سياقها الأوسع.

التصوير المائل، على النقيض من ذلك، لا نظير له في تسجيل المواقع الفردية ذات الأهمية التأريخية، وذلك لأن المصور يستطيع أن يختار الوقت من اليوم أو السنة ونوع الإضاءة التي سوف توضح أو تظهر المعالم الأثرية لفائدة أفضل (أنظر الشكل ٩).



شكل (٧): صورة جوية رأسية التقطت عام ١٩٣٠م في منطقة سيرفيتيري Cerveteri (شمال غرب روما). توضح الصورة عددا من المعالم المستديرة البيضاء موزعة في كل مكان تقريباً وتقابل روابي مدورة لمقابر قديمة (نقلا عن Guaitoli, 2003) .



شكل (٨): صورة جوية مائلة التقطت عام ٢٠٠٥م في فولتسي (إيطاليا) . تظهر الصورة بوضوح عددا كبيرا من معالم دائرية وهندسية متعلقة بمنطقة الاستيطان خلال العصرين الإتروسكي والروماني.

تحتوي الصور العمودية، بالطبع، على معلومات أثرية، لكن ذلك يحدث أكثر عن طريق الصدفة، وللجزء الأكبر في أوقات خالية من الظل من النهار أو السنة التي تناسب رسم الخرائط، بدلاً من التسجيل الأثري على وجه التحديد. بالرغم من ذلك، توجد أمثلة نتائج استثنائية أنجزت من خلال التصوير العمودي المسجل خصيصا لأغراض أثرية، حينما يكون تسجيل علامات المحاصيل أو علامات التربة في أفضل حالاته.

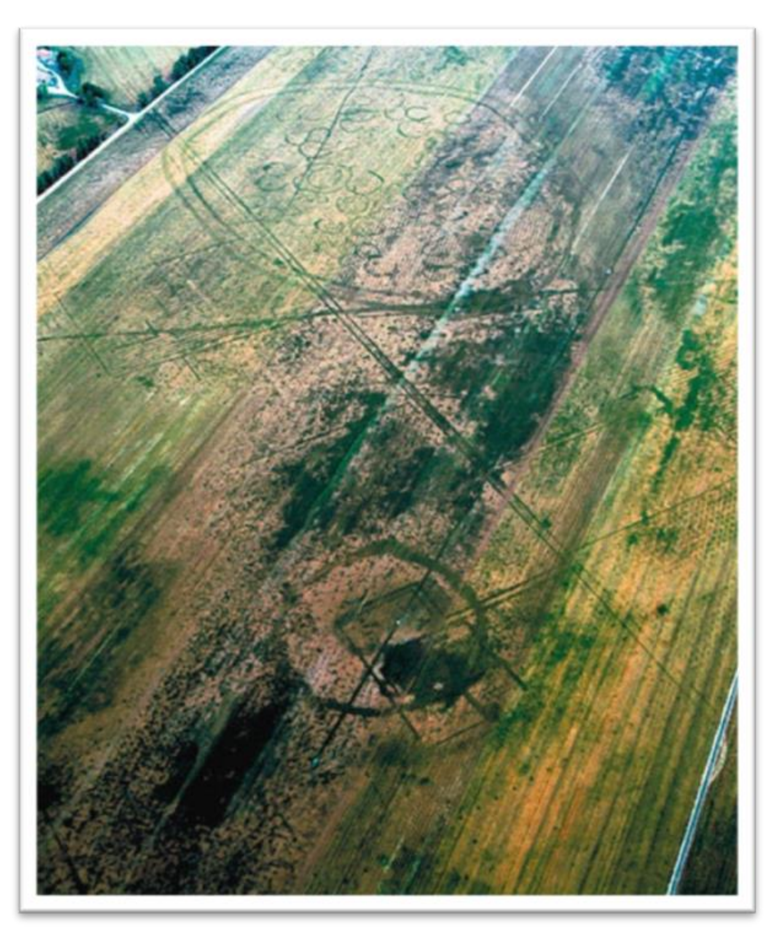
وهناك تجارب في كل من النمسا، إيطاليا، والمملكة المتحدة تم فيها توثيق حالات تؤيد أنه إذا أمكن ترتيب التغطية العمودية ضمن أفضل إطار وقت لرؤية الدليل الأثري، ثم المنطقة بأكملها، مع كل المواقع التي تكون مرئية في لحظة التصوير، يمكن حينئذ تصويرها في زوجيات من الصور (ستيريو) توفر نسخة طبق الأصل ثلاثية الأبعاد (3D) للمشهد العام المستهدف. هذا النوع من التوثيق يمكن أن يؤدي إلى تحسين كبير في التحليل وفهم المشاهد العامة القديمة. الصعوبات الرئيسية في هذه الممارسة هي التكلفة العالية نسبياً وضيق الوقت المتوفر لتخطيط وتنفيذ تغطية عمودية ضمن عدد محدود من الفرص عندما تكون الظروف مثالية للتسجيل.

في عملهم المحترف، يستخدم علماء الآثار نوعين من التصوير الجوي، العمودي والمائل، أكثر أو أقل على قدر المساواة. فإذا راجعنا على سبيل المثال برنامج رسم الخرائط الوطني الشامل لإنجلترا (National Mapping NMP Programme) سنجد أن هذا البرنامج بدأ في أواخر الثمانينات من القرن العشرين ولايزال جاريا من قبل هيئة إدارة التراث الوطني الإنجليزي، لقد غطى هذا البرنامج حوالي أربعين بالمئة من إنجلترا بحلول أبريل ٢٠٠٩م، وفيه قامت فرق من علماء تفسير الصور الجوية الآثارية العاملين بإطلاق معلومات موجودة في الملايين من الصور الجوية العمودية والمائلة التقطت منذ عام ١٩٤٥م. وهذا المشروع (NMP) ما زال مستمرا لتوفير معلومات عن المواقع الأثرية والمشاهد العامة لكل الفترات الزمنية من العصر الحجري الحديث إلى القرن العشرين، وأعطيت الأولوية لتلك المناطق من البلد التي هي تحت أعظم تهديد أو فقيرة التوثيق.

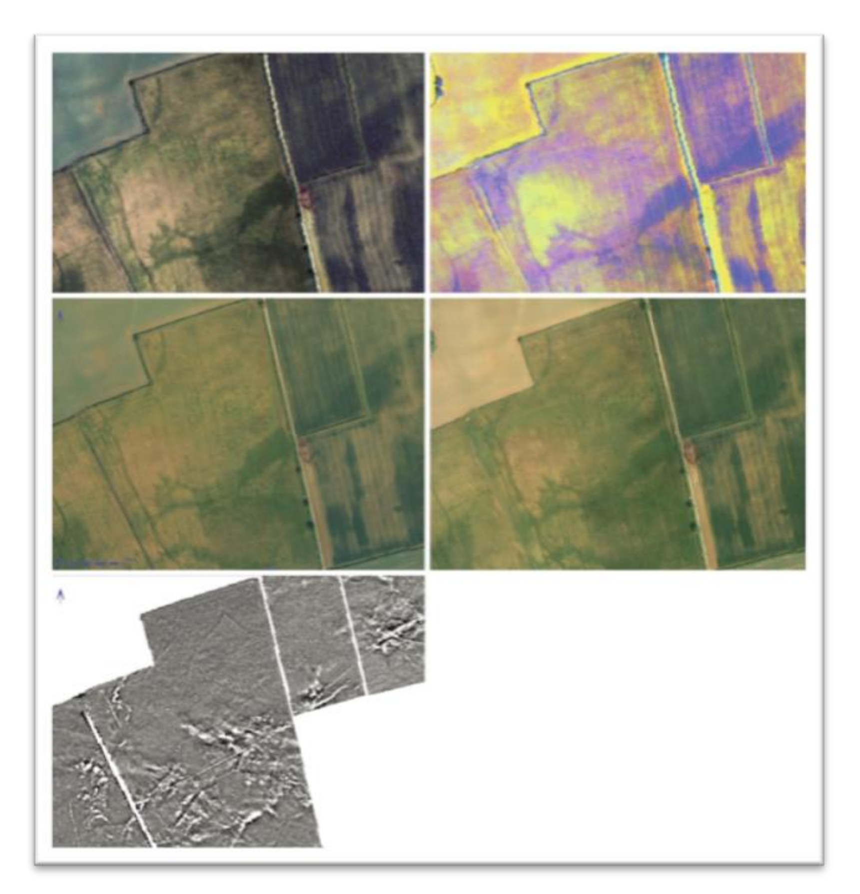
المسح متعدد الأطياف والمسح فائق الأطياف

(Multi-Spectral Scanning & Hyper-Spectral Scanning (MSS, HSS))

من المعروف أن فعالية التصوير الجوي محدودة بسبب الرؤية المتباينة للأدلة المطلوبة مثل علامات المحاصيل وعلامات التربة، على نحو ما أوضحنا سابقا. وهناك اتفاق واسع على أن صور المرئيات الملتقطة من مستشعرات متعددة الأطياف **Multi-Spectral Scanning** وفائقة الأطياف **Hyper-Spectral Scanning** يمكن أن تعالج بعض هذه المشاكل لأنها مجهزة بقدرات استشعار أعلى لرصد التغيرات في حالة الغطاء النباتي مقارنة بالمستشعرات المحصورة في المدى الطيفي المرئي أو البانكروماتي. في الحقيقة، لدى مستشعرات الأطياف المتعددة والأطياف الفائقة القدرة على النظر في وقت واحد عبر مدى واسع من الأطوال الموجية، ويقع أغلب هذه الأطوال في طيف الأشعة تحت الحمراء ذات الموجات القصيرة والقريبة. ويسمح هذا بتوفير معلومات إضافية هامة إلى الأطوال الموجية في المجال المرئي، ومن ثم نتحصل على تحسين في القدرة على تمييز كل من تأثير الغطاء النباتي، رطوبة التربة، والتغيرات في درجة الحرارة.



شكل (٩): صورة جوية مائلة التقطت في ٢٠٠٣م في ريف مدينة فوجيا. تظهر الصورة طبقات لمشهد الأرض الثقافي القديم. يمكن تمييز فترتين زمنيتين على الأقل: (١) عصر ما قبل التاريخ (٢) العصر الروماني. يبدو في الصورة اثنتان من موائل دائرية تعودان للعصر الحجري الحديث (واحدة منهما ذات خندق أحادي والثانية ذات خندق مزدوج) ويرتبط الموضعان بمراحل زمنية مختلفة قابلة للتمييز. وتضم المعالم التي تعود للعصر الحجري الحديث عدة أثار لنمط قياس الأراضي الزراعية ومد الطرق وكلها ذات صلة بمستوطنة استقرار قديمة يمكن ملاحظتها في أسفل اليسار.



شكل (١٠): صور الماسح الضوئي Daedalus 12 متعدد الأطياف، أطلقه مجلس موارد البيئة الطبيعية (NERC) يغطي حقل في غرب هيسليرتون، شمال يوركشاير، المملكة المتحدة . وثقت المعالم الرئيسية في صور وتشمل عدد من روابي الخنادق مربعة الشكل تعود للعصر الحديدي وطريق غير معبد يعود لعصور ما قبل التاريخ (نقلا عن : بوويلسلاند، مركز بحوث المشاهد العامة الطبيعية).

لقد أجريت دراسات رائدة في جنوب غرب الولايات المتحدة باستخدام التصوير الحراري الجوي لتحديد مناطق الزراعة القديمة بشكل أكثر وضوحاً مما كان ممكناً مع التصوير بالأبيض والأسود. أجريت هذه الدراسات مبكراً لتقييم كفاءة بيانات الأطياف المتعددة لتسجيل مناطق آثار في عديد من المناطق أهمها مواطن قبائل الهنود الحمر من شعب البويبلو وإطارها البيئي في منطقة شاكو كانيون في نيو مكسيكو.

في أوربا، وبفضل تطور المستشعرات متعددة الأطياف وفائقة الأطياف الذي أجرته وكالات الأبحاث الوطنية في كل من بريطانيا وإيطاليا، أنجزت عدة دراسات مهمة في تسعينيات القرن العشرين. على سبيل المثال، استخدمت في بريطانيا ماسحات الأطياف المتعددة المحمولة جواً لتقييم الإمكانية الأثرية لبيانات الأطياف المتعددة في عدد من المواقع. وأكملت هذه الصور التصوير العمودي وكشفت عن معلومات جديدة بواسطة الأطوال الموجية تحت الحمراء في أماكن مثل بيئات الأراضي الرطبة بمقاطعة فينلاندس شرقي إنجلترا ووادي بيكرينغ في الشمال (انظر الشكل ١٠).

كما أظهرت هذه الدراسات أن صور الأشعة الحمراء وتحت الحمراء توفر تحديد جيد لعلامات التربة وعلامات المحاصيل، وأن حزم موجات الأشعة الحمراء والقريبة من تحت الحمراء تتسم بحساسة عالية لتحديد صحة النباتات، وبالتالي، تسهم في الكشف الفعال عن الإجهاد المائي في الغطاء النباتي.

في إيطاليا، أجريت عدة اختبارات بشكل رئيسي من قبل الجيولوجيين وعلماء الأرض في استخدام رسام خرائط التوزيعات المحمول جواً (Airborne Thematic Mapper ATM) وهو ماسح ضوئي متعدد الأطياف يستخدم لاكتشاف أنماط البيئية القديمة ومعالم جيومورفولوجية، مثل قنوات الأنهار القديمة، مناطق الأهوار، ودليل للتغير الساحلي.

يساهم زيادة توفر صور الأطياف الفائقة، وكذلك الصور الحرارية، في توفير إمكانيات مهمة للغاية. في بريطانيا، على سبيل المثال يعد المصدر الأساسي للبيانات هو البيانات متعددة الأطياف وفائقة الأطياف وتوفرها مؤسسة البحث الجوي والمسح التي يديرها مجلس البحوث البيئة الطبيعية (Natural Environment Research Council NERC)، بينما في إيطاليا يتولى هذا البحث مجلس البحوث الوطني (National Research Council CNR).

ومنذ نهاية تسعينيات القرن العشرين وفي كلا البلدين، طبق الباحثون صور الأطياف المتعددة والأطياف الفائقة في تحليل مشهد الأرض الثقافي الطبيعي. لقد أظهر الاتجاه العام، المنبثق من عدد كبير من الدراسات في سياقات ثقافية وفيزيائية مختلفة على مر العقدين الماضيين، بأن هذه الأنواع من المستشعرات يمكن أن تكون مصدرا قيماً، يكمل المعلومات التي تم الحصول عليها من تقنيات الاستشعار عن بعد الأخرى وإضافة دعم محدد في التعرف على المعالم في المجال غير المرئي.

لدينا في البحث الآثاري في الوقت الراهن عيب رئيسي، هو ضعف الدقة المكانية لبيانات الأطياف المتعددة والأطياف الفائقة، إذ نجدها في حدود ٣- ٤ متر/ بكسل. فرغم أن هذا المستوى من الدقة مفيد جدا في تطبيقات أخرى، إلا أنه في التطبيق الآثاري مفيد فقط في الكشف عن المعالم ذات المقاييس الكبيرة.

التصوير الراداري "سار" (Synthetic Aperture Radar SAR)

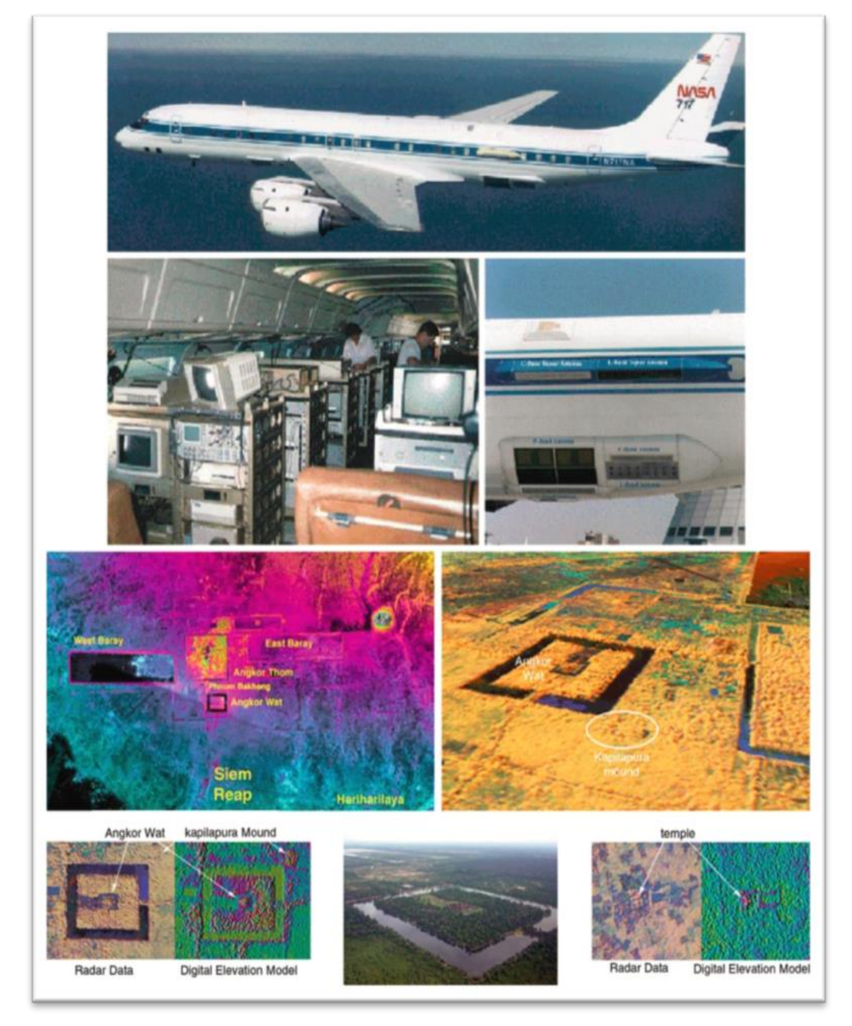
الرادار هو نظام استشعار نشط لموجات قصيرة، يرسل هذا الرادار نبضات موجهة من الطاقة الكهرومغناطيسية ويحدد وجود وموقع الأشياء بواسطة تحليل جزء الطاقة المنعكسة والراجعة الى جهاز الإرسال. الفائدة الرئيسية هي قدرته على اختراق السحاب، الضباب، والدخان، مما يجعل هذا المستشعر مناسبا "لكل أنواع الطقس". يمتلك النظام مجموعة متنوعة من التطبيقات في علوم الآثار (أنظر الشكل ١١).

منذ نهاية سبعينيات القرن العشرين، استخدم الرادار للبحث الآثاري في المسوحات الإقليمية لاكتشاف معالم ثقافية، طبيعية، وإنسانية. كما تم استخدامه لتحليل التغير في التوزيع المكاني للقطع الأثرية، وكذلك دراسات النظام البيئي ومراقبة التراث الثقافي. تحقق اكبر إنجاز في هذا الحقل في الولايات المتحدة الأمريكية، خاصة من قبل مختبر ناسا للدفع النفاث في معهد كالفورنيا للتقنية المسمى اختصارا كالتك (JPL / NASA). وفي هذا السياق، تم تطوير أساليب لاستخدام التصوير الراداري "سارSAR " أو الرادار ذي الفتحة التركيبية (Synthetic Aperture Radar) وذلك لتسجيل المواقع الأثرية لإدارة الموارد الثقافية وذلك للحد من خطر ارتفاع كلفة التأخير خلال مشروعات البناء.

ولا يزال تطبيق التصوير بالرادار في علم الآثار محدودا الى حد ما، خصوصاً في أوروبا، حيث أولى علماء الآثار وعلماء الاستشعار اهتماما أكثر بتقنية الـ "ليدارLiDAR" أي أنظمة الأطياف المتعددة والأطياف الفائقة. وبصفة عامة، ينحصر أبرز أشكال القصور في أنظمة الرادار للبحث الآثاري في الكلفة العالية وذلك لوجود المستشعرات لدى الشركات التجارية المالكة كما أن أقصى ما تستطيع الإشارات الرادارية أن تخترقه من التربة يتراوح فقط ما بين ٣ إلى ٥ أمتار، لكن هذا يتطلب أن تكون التربة جافة جداً وذات حبيبات ناعمة. فضلا عن وجود متخصص خبير في معالجة الصور وتفسير البيانات الأثرية.

التصوير بتقنية ليدار (LiDAR)

يعد "ليدار" أو جهاز تحديد الضوء والمدى Light detection and ranging أحد الأجهزة المحمولة جواً، ويقيس الارتفاع النسبي لسطح الأرض ومعالم أخرى (مثل الأشجار والمباني) عبر مناطق واسعة من مشهد الأرض الثقافي الطبيعي مع وضوح ودقة عالية لا تتوفر في مصدر آخر سوى بمسح ميداني كثيف أو بتصوير جوي بالطائرات فوتوجرامتري (Photogrammetry). يوفر تصوير "ليدار" للمرة الأولى، نماذج رقمية ثلاثية الأبعاد دقيقة وعالية التفصيل لسطح الأرض بدقة متر أو جزء من المتر. يعمل جهاز تحديد الضوء والمدى بواسطة حزم من نبضات ليزرية تصور الهدف من جانب إلى آخر أثناء تحليق الطائرة فوق منطقة المسح، ويتم قياس مدة الوقت التي تستغرقها مدة رجوع الإشارة إلى الطائرة (٢٠,٠٠٠-١٠٠,٠٠٠ نقطة بالثانية) لبناء نموذج دقيق وعالي الوضوح للسطح والمعالم التي عليها.



شكل (١١): طائرة التصوير الراداري المسماة AIRSAR وهي مختبر طائر متكامل (تقع لوحات الرصد والتسجيل خلف الجناح) تحمله طائرة معدلة أطلقتها ناسا وتحمل اسم DC-8. خلال جمع البيانات، تحلق الطائرة على ارتفاع ٨ كيلومتر بسرعة ٢١٥ متر في الثانية. يبين الصف الثاني من الشكل نظام الرادار المسير بالدفع السريع ذي الفتحة AIRSAR-JPL الاصطناعية التجريبية . ويساعد هنا تنوع الاستقطاب الكامل والأطوال الموجية لـ POLSAR-3 على تحديد الأهداف المقصودة من التصوير عند الحزم P, L, C في الاستقطابات HH, HV, VH, VV بثلاث أساليب وبعرض حزمة ٢٠، ٤٠، و٨٠ ميجاهيرتز. تزداد درجة الوضوح كلما زادت الطول الموجي ومع تناقص مساحة التغطية عند ٨٠ ميجاهيرتز للحزمة الطيفية L والبالغ طولها الموجي ١.٧ متر، وعند ٤٠ ميجاهيرتز عند الطول الموجي ٣.٣ متر، وعند ٢٠ ميجاهيرتز للطول الموجي ٦.٧ متر. ويكون عرض مساحة التغطية على الأرض ٥ كيلومتر مع ٨٠ ميجاهيرتز، ١٠ كيلومتر مع ٤٠ ميجاهيرتز، ١٥ كيلومتر مع ٢٠ ميجاهيرتز .ويقوم الماسح الضوئي TOPSAR بالتقاط نموذج ارتفاع رقمي (DEM) عالي الدقة في طولين موجيين اثنين، عبر مسار التداخل بين الحزمة L و C يسجل نموذج الارتفاع الرقمي في ٥ متر (٤٠ ميجاهيرتز)، وتتراوح دقة الارتفاع بين متر إلى ثلاثة أمتار. الصفان الثالث والرابع من الشكل يعرضان لمنطقة تسمى Angkor Wat وهو مركز ديني/حضري مهم كان يمتلك نظام مياه متطور مرتبط به في القرون من التاسع الى الخامس عشر. تقدر الذروة السكانية بحوالي مليون نسمة. تم تصوير هذه المنطقة بواسطة الماسح متعدد الأطياف SIR-C وAIRSAR . خلال رحلة رحلة AIRSAR التي جمعت فيها أيضا نماذج ارتفاع رقمية عالية الدقة. العمل التعاوني يعزز الفهم التاريخي بفضل الكشف عن الهياكل التي لم تكن معروفة من قبل. تعطينا منطقة Angkor Wat دروسا في فهم الهياكل الأثرية أحياناً تظهر في كل من صور الرادار ونماذج الأرتفاع الرقمي لكن عادة تظهر فقط في نماذج الأرتفاع الرقمي المتوفرة مشهد إدارة المياه. ويتضح في الصفين الثالث والرابع (من اليسار لليمين) ٧ صور تبين على التوالي: منظر عام للمكان؛ مشهد منظوري؛ نموذج ارتفاع رقمي TOPSAR؛ ربوة في وسط المكان؛ بيانات رادار ونموذج ارتفاع رقمي؛ معبد سمان تنج؛ بيانات رادار ونموذج ارتفاع رقمي (نقلا عن R. G. Bloom, JPL-NASA).

ولدت فكرة جهاز تحديد الضوء والمدى المحمول جواً في ستينيات القرن العشرين للكشف عن الغواصات واستخدمت النماذج الأولى بنجاح في بداية السبعينيات في الولايات المتحدة، كندا، وأستراليا. وجاء أول استخدام معروف لهذه التقنية للتسجيل الأثري كان في أمريكا بفضل البحث الرائد بالقرب من بركان أريدال في كوستاريكا بقيادة توم سيفر. في الدراسة الآثارية في عام ١٩٨٤م، استخدم سيفر وزملاؤه جهاز ليدار، وجهاز مسح الأشعة تحت الحمراء متعدد الأطياف الحرارية (TIMS)، SAR، وتصوير أشعة تحت الحمراء ملونة وذلك لاكتشاف طرق المستوطنين في عصور ما قبل التاريخ، وتوثيق طرق التجارة والحركة بين المستوطنات.

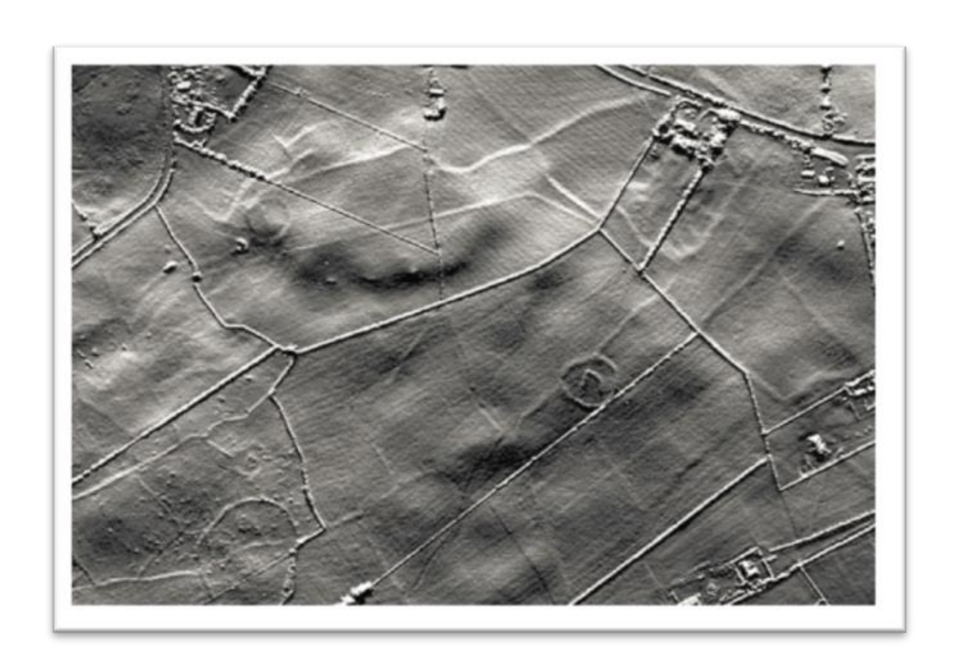
في أوربا، نوقشت إمكانية تطبيق جهاز ليدار في علم الآثار لأول مرة في ورشة عمل في ليزنو/ بولندا، في شهر نوفمبر سنة ٢٠٠٠م. وارتبط هذا بمسح نهر وارف في يوركشاير، الذي أظهر دليلا صخريا لحصن روماني أعتقد أنه سوي تماماً بواسطة الحرث. بعد سنوات قليلة في جامعة جنت البلجيكية، قال روبرت بيولي، رئيس وحدة المسح الجوي في منظمة حفظ التراث الإنجليزي آنذاك "إن إدخال جهاز ليدار يعد على الأرجح التطور الأكثر أهمية في الاستشعار عن بعد الآثاري منذ اختراع التصوير".

في السنوات التالية، تطورت تطبيقات "ليدار" في جميع أجزاء أوروبا وخصوصاً في كل من إنجلترا، النمسا، فرنسا، ألمانيا، النرويج، وإيطاليا. وتتمثل الفائدة الرئيسية التي يجنيها حاليا علماء الآثار من المسح بجهاز "ليدار" هي قدرته على توفير نموذج الارتفاع الرقمي (DEM) الذي يقدم دقة كبيرة في المشهد الثقافي الطبيعي الذي يمكن أن يكشف عن التضاريس الصغيرة التي لا يمكن عملياً تمييزها عن منسوب الأرض المجاورة بسبب التآكل الناجم عن الحرث (أنظر الشكل ١٢).

ولعل واحدة من أهم سمات جهاز "ليدار" هي قدرته على اختراق الغابات ومن ثم الكشف عن المعالم التي لا يمكن تمييزها من خلال طرق البحث التقليدية أو التي يصعب الوصول إليها من خلال المسح الأرضي كما هو الحال مثلا في العمل في جبل ليثا في النمسا، وبالمثل في تطبيقات بارزة في إلفيروم في النرويج، وفي راستات في ألمانيا، في المشهد العام لموقع ستون هينج في إنجلترا، وفي كاراكول في المكسيك.

ومن الجدير بالذكر أن الاهتمام بهذه التقنية لا يقتصر في قدرته على اختراق مناطق الغابات، لكن أيضاً لمساهمتها في دراسة السياقات المفتوحة، مثل المراعي والمناطق الصالحة للزراعة. في هذه المناطق، كما هو الحال تحت غطاء الغابات، فإن توفير نماذج رقمية دقيقة للغاية لسطح الأرض يجعل من الممكن تسليط الضوء على كل تغير صغير في المستوى، وبواسطة استخدام محاكاة حاسوبية، لتغير اتجاه أو زاوية الضوء وكذلك تحديد المبالغة في قيمة إحداثي الارتفاع (Z).

ولأغراض البحث الآثاري تم تطوير تقنيات رقمية للتخلص من العناصر "حديثة العمر" مثل الأشجار والمباني من أجل إنتاج نموذج تضاريس رقمي (DTM) لسطح الأرض الفعلي، مع استكمال أي عناصر متبقية من النشاط البشري القديم (أنظر الشكل ١٣). وتنعكس نبضات جهاز "ليدار" من المظلات التي تكونها الأشجار أو الفروع الأكثف الواقعة أسفلها، لكن النبضات الأخيرة يمكن أن تنعكس عن سطح الأرض. في تقنية ليدار يمكننا إذا استخدمنا هذه النبضات الأخيرة حصرياً القضاء - إلى حد كبير - على الإشارات التي تعكس قيم الغطاء النباتي.



شكل (١٢): صورة للمشهد العام أسفل مقابر Loughcrew في أيرلندا: أخذت الصورة بتقنية ليدار ذات التضاريس المظللة وتعرض لمناطق سكن وحدود حقول زراعية في منطقة رعي شهدت تطويرا عبر إزلة الأحجار وأنشطة الحراثة الدورية. لاحظ بقاء الشكل جيدا في الأرض غير المحروثة والمحمية بغطاء قانوني في أسفل اليسار. (المصدر: Dr. Colin A. Shell, Department of Archaeology، University of Cambridge, UK)



شكل (١٣): يبين الجزء الأعلى من الشكل صورة جوية تقليدية في غابات Welshbury Hill Fort (المملكة المتحدة). لا تساعد الغابات الكثيفة هنا في المسح الميداني المألوف، لذلك من المهم هنا اختبار التقنية الأفضل للاستشعار عن بعد المناسبة لمعالم هذه الغابات والتي يجب اختبار نتائجها لاحقا. ولقد استخدم المشروع بيانات جمعت بواسطة وحدة نمذجة المشاهد العامة الطبيعية بدقة أعلى من المعدل تسمح لخلق شبكة ذات خلية بقياس ٠.٢٥ متر. وقد وفر هذا لفريق حفظ التراث الإنجليزي ملفات شبكية ما قبل وما بعد المعالجة الخورازمية لإزالة الغطاء النباتي. أما الصورة الوسطى في الشكل فتظهر أول نبضة بيانات وسجلت سقف الغابة بنفس طريقة الصورة الجوية العادية : أي قمة مظلة الأشجار. بينما تعرض الصورة السفلى تقنية إزالة غطاء الأشجار لتكشف سطح الأرض . وربما تمثل "الأشجار" المتبقية مناطق من أوراق الشجر الكثيفة بشكل خاص أو جذوع الأشجار السميكة . (مصدر بيانات ليدار: Forestry Commission, Source Cambridge University, Unit for Landscape Modelling. March 2004).

في الوقت الحاضر، تتمثل طليعة تطبيقات "ليدار" في علم الآثار في استخدام طائرات الهليكوبتر كمنصات تصوير، مما يسمح بمسارات طيران أبطأ (سرعة) وأقل (انخفاضاً)، ميزة الرجوع المتعدد (الذي فيه عدة انعكاسات يمكن تسجيلها من نفس الدفعة، مثلاً، غطاء الأشجار والأرض كما في الشكل ١٣) مع ضمان تكرارية تصوير عالية لنفس الموقع، مما يتيح دقة أكبر لسطح الأرض. وعادة ما تصل كثافة التغطية إلى ٦٠ نقطة/ لكل متر مربع (الدقة حوالي ١٠سم) يمكن الحصول عليها بواسطة هذه الأساليب، مما يسمح لاختراق فعال حتى مع المناطق الخضراء عالية الكثافة والسماح بتسجيل الاختلافات الطبوغرافية الصغرى حتى أينما توجد بقايا المعالم الأثرية المتدهورة بشدة.

مع ذلك، هناك حاجة إلى قدر من الحذر. فإنتاج نموذج التضاريس الرقمي (DTM) بواسطة استخدام تكنولوجيا تحديد الضوء والمدى هي عملية معقدة وتشمل عدة افتراضات وقرارات طيلة سير العمل: في إعداد المشروع، جمع البيانات، وتحليلها لاحقاً. وعلى عالم الآثار أن يدرك ويفهم معنى المعلومات الوصفية (-Meta Information) حول كثافة النقطة الأصلية، توقيت رحلة الطيران، الأجهزة المستعملة، نوع المنصة الجوية، طريقة توليد نموذج التضاريس الرقمي (DTM)، الخ.

ويعتقد أنه إذا ما طبقت تقنية "ليدار" بشكل صحيح فمن المحتمل أن تحقق تأثيرا ثوريا على عملية رسم الخرائط الأثرية لما في قدرتها من تسجيل المصادر الأثرية المختبئة داخل مناطق الغابات والمشاهد العامة المنبسطة. وفي ظروف مواتية، قد تنكشف كل مشاهد الأرض "التاريخية". ويمكن أن يكون لهذا تأثير كبير على فرص إدارة وحفظ مشهد الأرض الطبيعي، بالإضافة على التحري العلمي عن مستوطنات بشرية في مختلف مراحل التاريخ.

التصوير الجوي من مسافة قريبة

منذ نهاية القرن التاسع عشر، عندما استخدم جياكومو بوني بالون لأخذ صور جوية لموقع "فورو رومانو" وحتى الوقت الحاضر، فهم علماء الآثار الرغبة في الحصول على صور جوية منخفضة الارتفاع لأغراض التوثيق، الصيانة، وإدارة المورد الثقافي. في هذه الحالة يلعب اكتشاف المعالم غير المعروفة سابقاً دورا ثانويا. لقد استخدمت أنواع مختلفة من المنصات المسيرة في علم الآثار وحقول علمية أخرى لرفع كاميرا التصوير وذلك للحصول على صور ذات مقياس واسع من ارتفاعات قليلة نسبياً (أنظر الشكل ١٤).

وفي كل من الطرق المذكورة أدناه فوائد وسلبيات مختلفة:

١-الكاميرات المثبتة على أبراج وأعمدة وقوائم رأسية: على الرغم من أن هذه المنصات مناسبة جدا من حيث قلة التكلفة، والثبات في الموقع، فضلا عن سهولة الحركة، إلا أنها محدودة في ارتفاعها الذي لا يزيد عادة عن ٢٠ مترا.

٢-الطائرات الورقية: شاع استخدام الطائرات الورقية في التصوير الجوي منخفض الارتفاع منذ سبعينيات القرن العشرين، يمكن لهذه المنصات المحمولة غير المكلفة أن تستوعب حمولة عدة كيلوغرامات. علاوة على ذلك، فإن الشيء الوحيد الذي تحتاجه للتشغيل الفعال هو الرياح. هذه الميزة

الاستقلالية هي ذاتها العيب الرئيس، فعادة ما تكون الرياح غير المنتظمة غير مناسبة للتصوير بالطائرات الورقية، كما أن حجم الطائرة الورقية يعتمد على سرعة الرياح.

٣- البالونات ومناطيد المراقبة الصغيرة: تقابل هذه الأجهزة أو تكمل التصوير بالطائرات الورقية ومن ثم يمكن أن تستخدم في ظروف رياح منخفضة جداً أو بدون رياح. بل إن التصوير بالبالون مرن للغاية في إجراءات إعداده وتشغيله. مع ذلك، تصبح البالونات والمناطيد الصغيرة صعبة التموضع والثبات في ظروف الجو العاصف. وكذلك غاز الهيليوم المستخدم في ملء البالون والمنطاد مكلف وصعب أو أحياناً مستحيل إيجاده في العدد من البلدان. كما أن قوارير الغاز المحمولة على البالون والمنطاد عادة ما تكون ثقيلة وغير عملية.

٤- طائرات ورقية مع بالون (هليكايت Helikite): هذا التصميم هو فريد من نوعه، حصل على براءة اختراع من قبل "ساندي ألسوب" في عام ١٩٩٣م، وحالياً تصنع من قبل شركة ألسوب. تجمع هذه الطريقة بين بالون صغير مملوء بالهيليوم مع طائرة ورقية ثابتة الجناح، لتأمين أفضل الخصائص من كلا المنصتين. يسمح البالون المملوء بالهيليوم للطائرة الورقية بالإقلاع في ظروف جوية ذات رياح ضعيفة، في حين مكونات الطائرات الورقية تصبح مهمة في وجود الرياح، تحسن الاستقرارية وتوفير القدرة على الوصول الى ارتفاعات أعلى.

٥- طائرات "درونزDrones ". وهي نوع من المركبات الجوية المسيرة بدون طيار (Unmanned Aerial Vehicles UAV). تشمل هذه الفئة طائرات نموذجية يمكن التحكم بها عن بعد وطائرات الهليكوبتر، عموماً وأجهزة متطورة تسمح بسيطرة على تلك المنصات بدقة عالية لإنتاج صور موزايك، وفي الحالات الأكثر تقدماً، زوجيات الصور التي تعطي رؤية مجسمة (الستريو فوتوغرامتري). ويتزايد استخدام هذه الأجهزة في علم الآثار بفضل التحسن في البرامج الفوتوغرامترية القادرة على إنتاج نماذج ثلاثية الأبعاد دقيقة في وقت قصير. وأيضاً توجد إمكانية تجهيز منصات الطائرات المسيرة بدون طيار بمدى واسع من أجهزة الاستشعار، من الكاميرات الحرارية أو كاميرات الأشعة تحت الحمراء إلى أنظمة "ليدار" وكاميرات الفيديو، الخ.

التحقق الميداني من البيانات الاستشعارية

المعلومات التي تم جمعها بواسطة أنظمة الاستشعار عن بعد تفقد الكثير من معناها المحتمل إذا لم تكتمل بمسح ميداني مفصل عن سطح الأرض في المنطقة محل البحث. عادةً ما يكون التصحيح الأرضي الفعال هو المفتاح الذي يفتح محتوى المعلومات للبيانات التي جمعت بالاستشعار عن بعد. يمثل العمل الميداني خطوة في العملية التي تهدف إلى التحقق وتحسين نتائج دراسة الاستشعار عن بعد من خلال المقارنة مع دليل مستقل.



شكل (١٤) : تسلسل الصور من أعلى لأسفل ومن اليسار لليمين. سلم لتوثيق التنقيب الأثري؛ برج مراقبة لالتقاط الصور؛ بيانات الماسح الليزري ويشمل تصوير الزرافة الذي يستخدم صارية تليسكوبية لرفع كاميرا رقمية عالية الدقة لارتفاعات غالباً بين ٥ الى ١٠ متر (واستخدمت للتصوير الرأسي وتكوين صورة فسيفسائية من مناطق صغيرة على مستوى عالي جداً من التفاصيل)؛ منطاد مراقبة صغير من جامعة سيانا، مركز تكنولوجيات الجغرافيا؛ طائرة ورقية؛ طائرة ورقية مزودة بمنطاد؛ بالون. وكما يبدو تتنوع هذه الوسائل من أنظمة مكلفة جداً ومركبات جوية مسيرة إلى منصات لطائرات مسيرة رخيصة للغاية. المصدر:

University of Siena, Laboratory of Landscape Archaeology and Remote Sensing (.LAP&T) and Centre of GeoTechnologies (CGT), H. Eisenbeiss and F. Remondino)

من الضروري في هذا السياق التركيز على أن كلمة "التحقق" لا تعني بالضرورة أن البيانات التي جمعناها من وسائل الاستشعار عن بعد يشوبها الخطأ. فإذا قمنا بتحليل بيانات الاستشعار عن بعد بشكل صحيح، فالأرجح أن تكون النتائج صحيحة. لكن مع ذلك يعد تحقق علماء الآثار بفحص سطح معالم الأرض ميدانيا أحد أصوليات الاستشعار عن بعد. هذه الخطوة في العملية ضرورية لتحديد مفاتيح التفسير ولتطوير أو تعزيز تصنيف الحالات الشاذة إلى فئات أثرية مفيدة ذات مستويات مختلفة من التفصيل والدقة التفسيرية، في تسلسل كما يلي:

١-خندق، حفرة، جدار، آثار تحصينات صخرية، الخ.

٢-أكوام مقابر، قبر، حظيرة، مستوطنة، الخ.

٣-ربوة مستديرة، ربوة طولية الشكل، حظيرة مستطيلة، منزل من العهد الروماني، الخ.

هناك عدة طرق يمكن اتباعها لتحقيق التقييم الأرضي لبيانات الاستشعار ذات القيم الشاذة Anomalies عما يحيط بها من بيانات. وأكثر الطرق شهرة في ذلك اتباع سلسلة مرهقة ومكلفة في وقت واحد، تقوم على أساس إزالة الحالات الشاذة ثم فحص تلك الحالات القليلة المتبقية بدون تحديد عبر المراحل الأولى من عملية الفرز. في هذا الأسلوب من التعامل مع كل حالة من حالات القيم الشاذة تعتمد التقنيات المستخدمة على الظروف التي يصادفها كل موقع: استخدام الأراضي، غطاء نباتي، الثقافة المادية، سياسات الصيانة، الخ. ويتخذ التسلسل الأساسي لهذه الطريقة مراحل يمكن تلخيصها على النحو التالي:

١-الفحص البصري خلال المسح الميداني مشياً على الأقدام. هناك قيمة كبيرة لاستخدام نظام معلومات جغرافي (GIS) متنقل بشرط أن يتوفر معه نظام تحديد الإحداثيات العالمية (GPS) وخرائط محدثة للمعالم المختارة للتصحيح الأرضي. وهذا يضمن الدقة اللازمة لتفتيش كل الحالات الشاذة. ويمكن رؤية المعالم الشائعة وتمييزها خلال العمل الميداني، إذ نجدها متمركزة بانحدارات وارتفاعات ذات أشكال منتظمة، أو اختلافات في رطوبة التربة، وتميز في تركيزات الحصى أو على ما يبدو صخور غير أصلية، أو قطع أثرية، الخ.

٢-أختبار عينات النواة Core Sampling. من الناحية المثالية، ينبغي في الميدان أن تؤخذ عينات مركزية أو من قلب منطقة الشذوذ المستهدفة وكذلك خارج حدودها الظاهرة. يمكن أن يتضمن الدليل وجود فحم، تربة محترقة، عظام، كسر فخارية، أو أنواع أخرى من القطع الفخارية. بهذه الطريقة يستطيع الباحث في الميدان أن يحدد ما إذا كان المعلم موجود بالاعتماد على فحص عينات النواة في التربة.

٣-مجسات الاختبار أو فحص المجرفة. هذه طريقة شائعة، تتكون من تنقيب حفرة صغيرة (عموماً ذات قياس ١ متر× ١ متر) إلى سطح التربة العقيمة التي لا تخبرنا بشيء، أو الى عمق من ٧٠-١٢٠سم (بالاعتماد على استقرار أو عدم استقرار المقاطع الطولية). وهذا يجعل من الممكن أن نلاحظ في الحقل أي وجود أو تباين في تركيز القطع الأثرية أو المواد الثقافية الأخرى. وكما في اختبار عينات النواة ميدانيا، ينبغي أن تُحفر المجسات في أزواج ثنائية، واحدة داخل منطقة البيانات الشاذة والأخرى خارجها. الفائدة الرئيسية من اختبار عينات النواة المركزية ومجسات الاختبار هي الكلفة المنخفضة والحد الأدنى من الجهد.

٤- الحد الأدنى للتنقيب عبر الطبقات: وهو أسلوب إن أحسن التخطيط له يمكن أن يكون فعالا وموثوقا في التحقق من المعالم ميدانيا وذلك بطريقة غير مرهقة وبكلفة غير مرتفعة. ولسوء الحظ، قد لا تكون هذه التقنية (وأيضاً فحص عينات النواة وحفر المجسات) ممكنة في كثير من الدول التي تفرض فيها العوامل السياسية والاجتماعية قيودا مرهقة على التحقق الميداني.

٥- الحفائر الأثرية الآلية. ربما النوع الأكثر إقناعاً من التصحيح الأرضي هو إزالة الطبقة السطحية للتربة أو طبقات الأرض المحروثة عبر مناطق كبيرة ومتجاورة. ثم بعد ذلك يمكن وضع علامات على المعالم تحت سطح الأرض، ورسم خرائط لها، وتنقيبها جزئياً أو كلياً. تطبق هذه العملية بشكل رئيسي للتحقق من نتائج التقييمات الأثرية المتعارضة مع أعمال البنى التحتية وأنواع أخرى من أعمال البناء الرئيسية.

تكامل بيانات نظم المعلومات الجغرافية (GIS): التفسير ورسم الخرائط

ألف "ليليساند" و"كيفر" واحدا من أكثر الكتيبات الموثوقة عن الاستشعار عن بعد، ويؤكدان فيه على المفاهيم الأساسية والمبادئ المؤسسة للاستشعار عن بعد على النحو التالي:

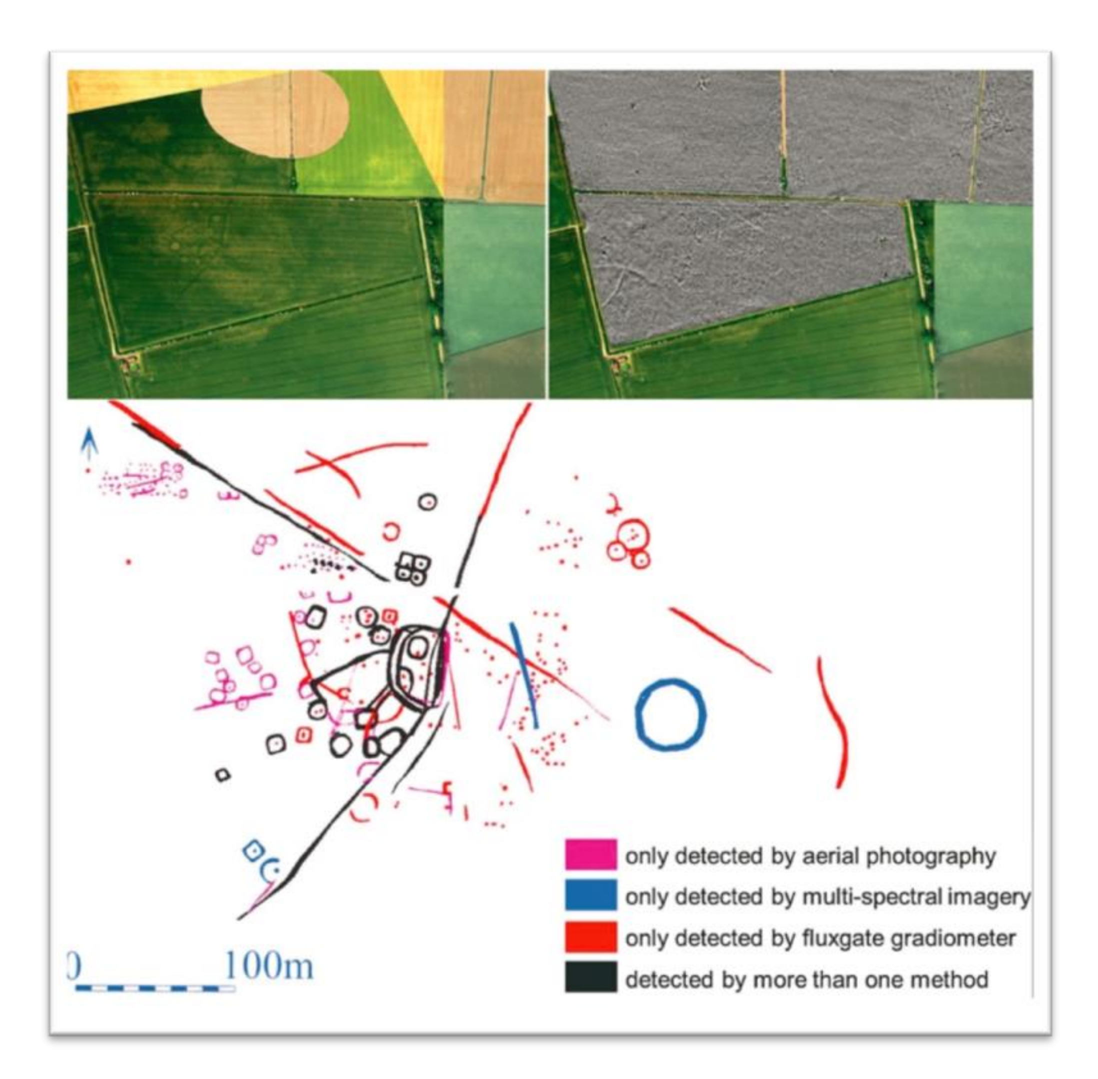
" يرتكز التطبيق الناجح للاستشعار عن بعد في دمج وتكامل مصادر بيانات متعددة غير مترابطة مع الإجراءات التحليلة. لا توجد مجموعة بعينها من طرق دمج بيانات المستشعرات مع إجراءات التفسير واعتبارها الطريقة الحصرية المناسبة للإحاطة بكل المصادر وتطبيقات المراقبة البيئية." وهذا التعريف صحيح تماماً للاستشعار عن بعد الآثاري.

هنالك شرط مسبق لدمج بيانات الصور التي حصلنا عليها عن طريق الاستشعار عن بعد ألا وهو توثيق كل موقع قياس بنظام الإحداثيات الجغرافية. ويؤدي الفشل في تلبية هذا الشرط إلى عدم القدرة على تحديد موقع البيانات المكتسبة. ويعد إدخال البيانات إلى نظام المعلومات الجغرافية هو الأساس لأي محاولة لدمج المعلومات من أجل تطوير السرد التاريخي/الأثاري أو لضمان صيانة المصدر الأثري. لا يمثل الإرجاع الجغرافي للبيانات التي حصلنا عليها بالاستشعار عن بعد نهاية عملية رسم الخرائط الأثرية، بل مرحلة وسيطة. وبدون الإرجاع الإحداثي لن نحصل على معلومات كثيرة مفيدة إذا اعتمدنا فقط على صور الأقمار الاصطناعية، والصور الجوية، ومرئيات "ليدار"، والصور الجيوفيزيائية.

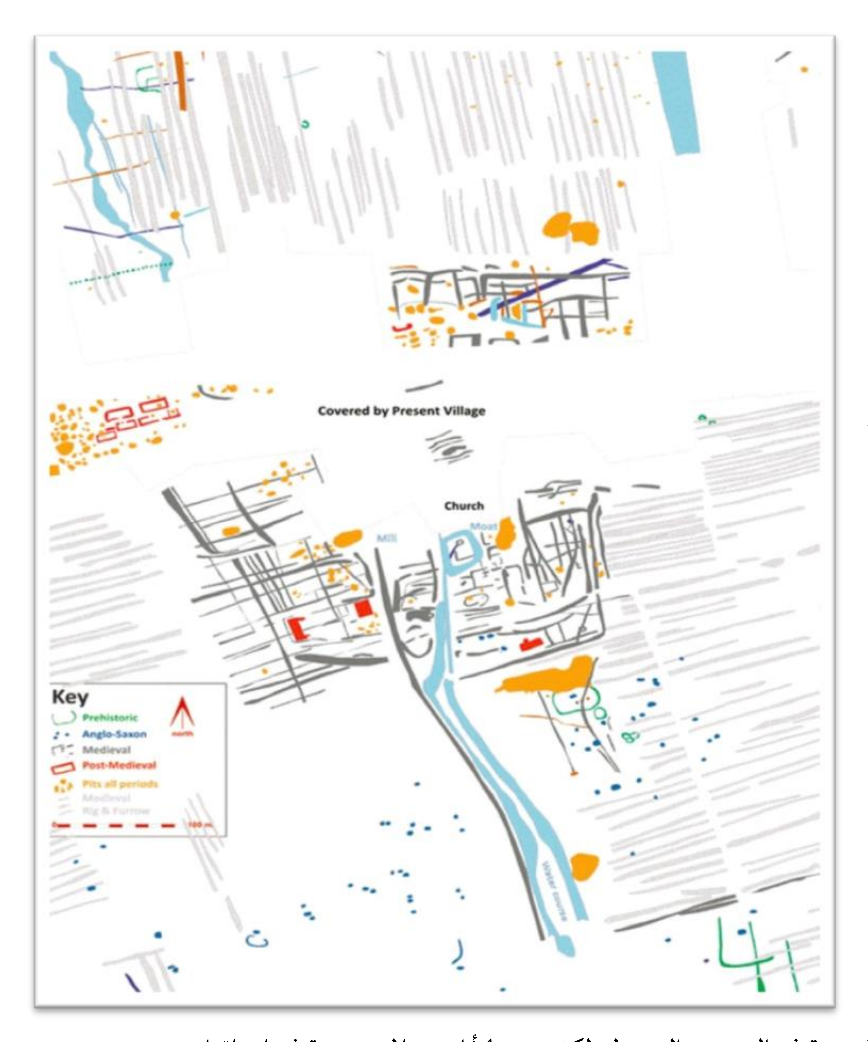
تقع على كاهل الآثاري (بالتعاون مع مختصين آخرين بالطبع) مسؤولية منح الصور حسا آثاريا فضلا عن قياسات العوامل الكيمائية والفيزيائية في التربة. باختصار، يصبح تفسير البيانات حقيقة وقابل للنقل من خلال رسم خرائط لتلك العناصر التي تم تصنيفها باعتبارها عناصر شذوذ anomalies. وهذه هي المرحلة الحرجة في بحث المشهد العام الثقافي الطبيعي والأثاري. ومن الناحية العملية، تتقدم العملية من خلال الرسم، رقمياً أو يدوياً، لعناصر الشذوذ والعناصر الأخرى التي تعتبر ذات أهمية أثرية. ويعمل الكل معا، فاستعادة المعلومات ذات الاحداثيات الجغرافية سواء الموجودة بالصور الجوية العمودية والمائلة، أو في صور الأقمار الصناعية عالية الدقة. أو في البيانات التي حصلنا عليها بواسطة جهاز "ليدار"، وكذلك في الخرائط المشتقة من المقاييس الجيوفيزيائية، كل ذلك يساهم في

إمكانية تراكب البيانات ومضاهاتها مع الخرائط الطبوغرافية ونتائج تحري مختلفة، مع حزمة أخرى من بيانات تراصت على مر السنين طبقة فوق طبقة (أنظر الشكل ١٥).

النتيجة هي أن لدينا معلومات متفرقة أشبه بلغز مؤلف من قطع متفرقة لابد من إعادة تجميعها معا لتعطي صورة ذات مغزى. وفي الوقت نفسه، من الممكن فهم الصور الشاملة، سواء كانت مرحلة واحدة أو تنتشر عبر الزمن، جنباً إلى جنب مع تراكب وتطابق الأجزاء من كل الأنظمة للمشاهد العامة القديمة وتلك الراجعة إلى القرون الوسطى. فمن خلال رسم الخرائط الآثارية واستخدام نظم المعلومات الجغرافية، يصبح من الممكن دراسة هذه الأجزاء معاُ مع طبقات معلومات أخرى أثرية وغير أثرية من أجل كتابة التاريخ، وحماية التراث من خلال عملية تخطيط، وصيانة ومراقبة الموروث الثقافي المشترك (أنظر الشكل ١٦).



شكل (١٥) : يظهر الشكل أن جمع الصور الجوية مع البيانات الجيوفيزيائية يؤكد أنه ليس بوسع أي من الأسلوبين القدرة على إعطاء نفس النتائج، وهو ما يؤكد على أن الطاقة الاستيعابية الآثارية لمشهد الأرض الثقافي يتطلب استخدام منهج الاستعانة بمستشعرات متعددة (المصدر: Dominic Powlesland, Landscape Research Centre).



شـــكل (١٦): خريطـــة لمنطقـــة شـــرق هيســـلرتون (المملكـــة المتحـــدة) توضـــح إدمـــاج الأســـاليب والبيانـــات في عمليـــة رســـم خـــرائط للدليل وفهم المشـاهد العامة الطبيعية الثقافية. بينما الأطلال الناجية من قرية العصور الوسطى اللاحقـة تظهـر جيـداً في الصـور الجويـة للتراث الإنجليزي، كمـا تظهـر المسـوحات الجيوفيزيائيـة قـدرا أكثـر مـن التفاصـيل لقـرى في العصـور الوسطى والعصور اللاحقة، خصوصاً في المناطق خـارج القريـة الحاليـة للشـمال والغـرب منهـا. فـإلى الغـرب من القريـة الحاليـة، نجـد سلسـلة طويلـة مـن حظـائر (موائـل) مسـتطيلة ذات جوانـب قصـيرة محاذيـة للمسـار الحـالي الـذي ينـزل مـن الأراضـي المفتوحـة وتسـمى كروفـت وتوفـت crofts and tofts. التوفت tofts هو حيث تـم بنـاء المنزل محـاط بمنطقـة حديقـة صـغيرة، خلفهـا الكروفت crofts ربمـا اسـتخدم لانتـاج الطعام المحلي. وقـد قسـمت الأرض خلـف القريـة إلى نمـط متمـاوج مـن ثنائيـة "أخـدود وارتفـاع "rig and furrow'، وهـو نظام الحقل الشـريطي الـذي سـيطر على المشـاهد العامـة الطبيعيـة في العصـور الوسـطى لكثير من الأراضي المنخفضـة في انجلترا. جهـزت القريـة بالمياه من ينـابيع في أسـفل الأراضي المفتوحـة العاليـة . إلى الجنـوب، تمت إدارة قنـاة مجـرى طبيعـي مـن تـاريخ مبكـر مـن اسـتخدام المياه لتدوير مطحنة وملء خندق مائي مرتبط ببيت المزرعة . وكان يُظن أن موقع المزرعة دمر بشكل كبير عندما تم بناء الكنيسـة الحالية، بأمر من السير تاتون سايكس من سليدمير وصممت من قبل المهندس المعماري الفيكتوري الشـهير G. E. Street، بنيت بين عـامي ١٨٧٣م و١٨٧٧م، صـمم المهنـدس أيضاً مقر القسـيس وشـيدت مباني أكثر لأيواء فريق البناء. هـدمت العديـد من المنـازل المتبقيـة خلال القرن الأخير في الحقـل مبـاشـرة الى الغـرب من القريـة والى الجنـوب من طريـق ٦٤أ، الـذي يمر خلال الجزء الشـمالي من قريـة العصـور الوسـطى. تشـير الأدلـة بـأن القريـة التي تنجـو اليـوم تعتبر أصـغر بمـرات من الموجودة في العصـور الوسـطى، وعليه، وسـميت قريـة متقلصـة . (مصـدر الخريطـة: D. Powlesland, Landscape Research Centre)

قائمة المراجع

Adams, R. E. W., 1980. Swamps, canals, and the location of ancient Maya cities. *Antiquity*, 54(212), 206–214.

Aqdus, S. A., Drummond, J., and Hanson, W. S., 2008. Discovering archaeological cropmarks: a hyperspectral approach. In Chen, J., Jiang, J., and Maas, H.-G. (eds.), *XXIst Congress of the Interna- tional Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Techni- cal Commission V, July 3–11, 2008, Beijing, China*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVII B5, pp. 361–365.

Avery, T. E., and Lyons, T. R., 1981. *Remote Sensing: Aerial and Terrestrial Photography for Archaeologists*. Washington, DC: Cultural Resources Management Division, National Park Service, U.S. Dept. of the Interior.

Barber, M., 2011. *A History of Aerial Photography and Archaeol- ogy: Mata Hari's Glass Eye and Other Stories*. Swindon: English Heritage.

Beck, A. R., 2011. Archaeological applications of multi/hyper- spectral data – challenges and potential. In Cowley, D. C. (ed.), *Remote Sensing for Archaeological Heritage Management: Pro- ceedings of the 11th EAC Heritage Management Symposium, Reykjav´ık, Iceland, 25–27 March 2010*. EAC Occasional Paper 5. Brussel: Europae Archaeologiae Consilium, pp. 87–97.

Bewley, R. H., 2002. Aerial survey: learning from a hundred years of experience? In Bewley, R. H., and Rączkowski, W. (eds.), *Aerial Archaeology: Developing Future Practice*. Amsterdam: IOS Press. NATO Science Series I, Life and Behavioural Sciences, Vol. 337, pp. 11–18.

Bewley, R. H., 2005. Aerial archaeology. The first century. In Bour- geois, J., and Meganck, M. (eds.), *Aerial Photography and Archaeology 2003: A Century of Information*. Ghent: Academia Press. Archaeological Reports Ghent University, Vol. 4, pp. 15–30.

Bewley, R. H., Crutchley, S. P., and Shell, C. A., 2005. New light on an ancient landscape: LiDAR survey in the Stonehenge World Heritage Site. *Antiquity*, 79(305), 636–647.

Bloom, R. G., 1992. Space technology and the discovery of Ubar. *Point of Beginning*, 17(2), 11–20.

Boni, G., 1900. *Fotografie e pianta altimetrica del Foro Romano*. Rome: Reale Accademia dei Lincei.

Bradford, J., 1957. *Ancient Landscapes: Studies in Field Archaeol- ogy*. London: Bell.

Campana, S., 2009. Archaeological site detection and mapping: some thoughts on differing scales of detail and archaeological 'non-visibility'. In Campana, S., and Piro, S. (eds.), *Seeing the Unseen: Geophysics and Landscape Archaeology*. London: Taylor & Francis, pp. 5–26.

Campana, S., 2011. 'Total archaeology' to reduce the need for res- cue archaeology: the BREBEMI project (Italy). In Cowley, D. C. (ed.), *Remote Sensing for Archaeological Heritage Manage- ment: Proceedings of the 11th EAC Heritage Management Sympo- sium, Reykjav´ık, Iceland, 25–27 March 2010*. EAC Occasional Paper 5. Brussel: Europae Archaeologiae Consilium,

pp. 33–41.

Cavalli, R. M., Marino, C. M., and Pignatti, S., 2003. Hyperspectral airborne remote sensing as an aid to a better understanding and characterization of buried elements in different archaeological sites. In Forte, M., and Williams, P. R. (eds.), *The Reconstruction of Archaeological Landscapes through Digital Technologies: Proceedings of the 1st Italy-United States Workshop, Boston, Massachusetts, USA, November 1–3, 2001*. British Archaeolog- ical Reports, International Series 1151. Oxford: Archaeopress, pp. 29–32.

Comer, D. C., and Blom, G. R., 2007. Detection and identification of archaeological sites and features using synthetic aperture radar (SAR) data collected from airborne platforms. In Wiseman, J., and El-Baz, F. (eds.), *Remote Sensing in Archaeology*. New York: Springer, pp. 103–136.

Crawford, O. G. S., and Keiller, A., 1928. *Wessex from the Air*. Oxford: Clarendon Press.

Deuel, L., 1969. *Flights into Yesterday. The Story of Aerial Archae- ology*. London: Macdonald.

Devereux, B. J., Amable, G. S., Crow, P., and Cliff, A. D., 2005. The potential of airborne lidar for detection of archaeological features under woodland canopies. *Antiquity*, 79(305), 648–660.

Doneus, M., 2001. The impact of vertical photographs on analysis of archaeological landscapes. In Doneus, M., Eder-Hinterleitner, A., and Neubauer, N. (eds.), *Archaeological Prospection: 4th International Conference on Archaeological Prospection, Vienna, 19–23 September 2001*. Vienna: Austrian Academy of Sciences Press, pp. 94–96.

Doneus, M., and Briese, C., 2006. Full-waveform airborne laser scanning as a tool for archaeological reconnaissance. In Campana S., and Forte, M. (eds.), *From Space to Place. 2nd International Conference on Remote Sensing in Archaeology : Proceedings of the 2nd International Workshop, CNR, Rome, Italy, December 4–7, 2006*. British Archaeological Reports, International Series 1568. Oxford: Archaeopress, pp. 99–105.

Doneus, M., and Briese, C., 2011. Airborne laser scanning in for- ested areas – Potential and limitations of an archaeological prospection technique. In Cowley, D. C. (ed.), *Remote Sensing for Archaeological Heritage Management: Proceedings of the 11th EAC Heritage Management Symposium, Reykjav´ık, Ice- land, 25–27 March 2010*. EAC Occasional Paper 5. Brussel: Europae Archaeologiae Consilium, pp. 59–76.

Doneus, M., Neubauer, W., Verhoeven, G., and Briese, C., 2011. Advancing archaeological airborne remote sensing: core con- cepts of the LBI-ArchPro initiative. In Drahor, M. G., and Berge,
M. A. (eds.), *Archaeological Prospection: 9th International Conference on Archaeological Prospection, September 19–24, Izmir, Turkey*. Istanbul: Archaeology and Art Publications, pp. 12–15.

Donoghue, D. N. M., 2001. Multispectral remote sensing for archaeology. In Campana, S., and Forte, M. (eds.), *Remote Sens- ing in Archaeology: XI Ciclo di lezioni sulla ricerca applicata in archeologia, Certosa di Pontignano (Siena), 6–11*

dicembre 1999. Florence: All'Insegna del Giglio, pp. 181–192.

Donoghue, D. N. M., Beck, A., Galiatzatos, N., McManus, K., and Philip, G., 2006. The use of remote sensing data for visualising and interpreting archaeological landscapes. In Baltsavias, E., Gruen, A., Van Gool, L., and Pateraki, M. (eds.), *Recording, Modeling and Visualization of Cultural Heritage*. Leiden: Taylor and Francis, pp. 317–326.

Eisenbeiss, H., 2009. UAV photogrammetry. D.Sc. dissertation, Uni- versity of Zürich. Zürich IGP Mitteilungen Nr.105.
http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:498/eth-498-02.pdf#search=%22(author:henri eisenbeiss)%22.

Galiatsatos, N., 2014. Exploring archaeological landscapes with satellite imagery. In Remondino, F., and Campana, S. (eds.), *3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Her- itage: Theory and Best Practices*. Oxford: Archaeopress. British Archaeological Reports, International Series, Vol. 2598, pp. 89–100.

Going, J. C., 2002. A neglected asset. German aerial photography of the Second World War period. In Bewley, R. H., and Rączkowski, W. (eds.), *Aerial Archaeology: Developing Future Practice*. Amsterdam: IOS Press. NATO Science Series I, Life and Behavioural Sciences, Vol. 337, pp. 23–30.

Guaitoli, M. (ed.), 2003. *Lo sguardo di Icaro: Le collezioni dell'Aerofototeca nazionale per la conoscenza del territorio*. Roma: Campisano.

Hargrave, M. L., 2006. Ground truthing the results of geophysical survey. In Johnson, J. K. (ed.), *Remote Sensing in Archaeology: An Explicitly North American Perspective*. Tuscaloosa: The University of Alabama Press, pp. 269–304.

Holcomb, D. W., and Shingiray, I. L., 2007. Imaging radar in archaeological investigations: an image processing perspective. In Wiseman, J., and El-Baz, F. (eds.), *Remote Sensing in Archae- ology*. New York: Springer, pp. 11–45.

Holden, N., Horne, P., and Bewley, R. H., 2002. High-resolution digital airborne mapping and archaeology. In Bewley, R. H., and Rączkowski, W. (eds.), *Aerial Archaeology: Developing Future Practice*. Amsterdam: IOS Press. NATO Science Series I, Life and Behavioural Sciences, Vol. 337, pp. 173–180.

Horne, P., 2011. The english heritage national mapping programme. In Cowley, D. C. (ed.), *Remote Sensing for Archaeological Heritage Management: Proceedings of the 11th EAC Heritage Management Symposium, Reykjav´ık, Iceland, 25–27 March 2010*. EAC Occasional Paper 5. Brussel: Europae Archaeologiae Consilium, pp. 143–151.

Jones, R. J. A., and Evans, R., 1975. Soil and crop marks in the rec- ognition of archaeological sites by air photography. In Wilson, D. R. (ed.), *Aerial Reconnaissance for Archaeology*. London: Council for British Archaeology. Research reports, Council for British Archaeology, Vol. 12, pp. 1–11.

Khawaga, M., 1979. A contribution to fractal pattern of the Abu Tartar plateau, Western Desert, Egypt. *Annals of the Geological Survey of Egypt*, 9, 163–171.

Lasaponara, R., and Masini, N., 2012. *Satellite Remote Sensing. A New Tool for*

Archaeology. Dordrecht: Springer. Remote Sens- ing and Digital Image Processing, Vol. 16.

Lillesand, T. M., and Kiefer, R. W., 1994. *Remote Sensing and Image Interpretation*, 3rd edn. New York: Wiley.

Lyons, T. R., and Avery, T. E., 1977. *Remote Sensing: A Handbook for Archaeologists and Cultural Resources Managers*. Washing- ton, DC: Cultural Resources Management Division, National Park Service, U.S. Dept. of the Interior. Contribution of the Chaco Center, Vol. 4.

Lyons, T. R., and Mathien, F. J., 1980. *Cultural Resources Remote Sensing*. Washington, DC: Cultural Resources Management Division, National Park Service.

McCauley, J. F., Schaber, G. G., Breed, C. S., Grolier, M. J., Haynes, C. V., Issawi, B., Elachi, C., and Blom, R., 1982. Sub- surface valleys and geoarcheology of the eastern Sahara revealed by shuttle radar. *Science*, 218(4576), 1004–1020.

McHugh, W. P., Schaber, G. G., Breed, C. S., and McCauley, J. F., 1989. Neolithic adaptation and the Holocene functioning of the Tertiary palaeodrainages in southern Egypt and northern Sudan. *Antiquity*, 63(239), 320–336.

Moore, E., Freeman, T., and Hensley, S., 2007. Spaceborne and air- borne radar at Angkor: introducing new technology to the ancient site. In Wiseman, J., and El-Baz, F. (eds.), *Remote Sens- ing in Archaeology*. New York: Springer, pp. 185–216.

Musá, A. H., Dolphin, L. T., and Mukhtar, M. J., 1977. *Applications of Modern Sensing Techniques to Egyptology*. Menlo Park, CA: SRI International.

Musson, C., 1994. *Wales from the Air: Patterns of Past and Present*. Aberystwyth: Royal Commission on the Ancient and Historical Monuments of Wales.

Opitz, R. S., and Cowley, D. C., 2013. *Interpreting Archaeological Topography. Airborne Laser Scanning, 3D Data and Ground Observation*. Oxford: Oxbow Books.

Palmer, R., 2000. A view from above: can computers help aerial survey? In Lock, G. R., and Brown, K. (eds.), *On the Theory and Practice of Archaeological Computing*. Oxford: Oxford University Committee for Archaeology. Oxford Univer- sity Committee for Archaeology, Monograph, Vol. 51, pp. 107–131.

Palmer, R., 2007. Seventy-five years v. ninety minutes: implications of the 1996 Bedfordshire vertical aerial survey on our percep- tions of clayland archaeology. In Mills, J., and Palmer,
R. (eds.), *Populating Clay Landscapes*. Tempus: Stroud, pp. 88–103.

Parcak, S. H., 2009. *Satellite Remote Sensing for Archaeology*. New York: Routledge.

Piccarreta, F., and Ceraudo, G., 2000. *Manuale di aerofotografia archeologica. Metodologia, tecniche e applicazioni*. Bari: Edipuglia.

Poidebard, A., 1927. Les routes anciennes en Haute-Djézireh. *Syria*, 8, 55–65.

Pope, K. O., and Dahlin, B. H., 1989. Ancient Maya wetland agri- culture: new insights from ecological and remote sensing research. *Journal of Field Archaeology*, 16(1), 87–106.

Powlesland, D., 2006. Redefining past landscapes: 30 years of remote sensing in the Vale of Pickering. In Campana S., and Forte, M. (eds.), *From Space to Place. 2nd International Confer- ence on Remote Sensing in Archaeology : Proceedings of the 2nd International Workshop, CNR, Rome, Italy, December 4–7, 2006*. British Archaeological Reports, International Series 1568. Oxford: Archaeopress, pp. 197–201.

Powlesland, D., 2010. Identifying mapping and managing the unmanageable: the implication of long term multi-sensor research into the archaeology of the Vale of Pickering. Yorkshire, England. In Forte, M., Campana, S., and Liuzza, C. (eds.), *Space, Time, Place: Third International Conference on Remote Sensing in Archaeology, 17th–21st August 2009, Tiruchirappalli, Tamil, Nadu, India*. British Archaeological Reports, International Series 2118. Oxford: Archaeopress, pp. 9–16.

Powlesland, D., and Donoghue, D. N. M., 1993. A multi-sensory approach to mapping the prehistoric landscape. In *Proceedings of the 9th Natural Environment Research Council Airborne Sym- posium*. Swindon, UK: NERC, pp. 88–96.

Rączkowski, W., 2001. Science and/or art: aerial photographs in archaeological discourse. *Archaeologia Polona*, 39, 127–146.

Rączkowski, W., 2005. To overcome infirmity. Current approaches to aerial archaeology in Poland. In Bourgeois, J., and Meganck, M. (eds.), *Aerial Photography and Archaeology 2003: A Century of Information*. Ghent: Academia Press. Archaeolog- ical Reports Ghent University, Vol. 4, pp. 121–135.

Remondino, F., 2011. 3D recording for cultural heritage. In Cowley, D. C. (ed.), *Remote Sensing for Archaeological Heritage Man- agement. Proceedings of the 11th EAC Heritage Management Symposium, Reykjav´ık, Iceland, 25–27 March 2010*. Europae Archaeologia Consilium Occasional Paper No. 5. Brussels: EAC, pp.107–115.

Remondino, F., 2014a. Photogrammetry: theory. In Remondino, F., and Campana, S. (eds.), *3D Recording and Modelling in Archae- ology and Cultural Heritage Theory and Best Practices*. Oxford: Archaeopress. British Archaeological Reports, International Series, Vol. 2598, pp. 65–73.

Remondino, F., 2014b. UAV: Platforms, regulations, data acquisi- tion and processing. In Remondino, F., and Campana, S. (eds.), *3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Her- itage: Theory and Best Practices*. Oxford: BAR International Series, Vol. 2598, pp. 74–87.

Remondino, F., and Campana, S. (eds.), 2014. *3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage: Theory and Best Practices*. Oxford: Archaeopress. British Archaeological Reports, International Series, Vol. 2598.

Risbøl, O., Gjertsen, A. K., and Skare, K., 2006. Airborne laser scanner of cultural remains in forest: some preliminary results from Norwegian project. In Campana S., and Forte, M. (eds.), *From Space to Place. 2nd International Conference on Remote Sensing in Archaeology : Proceedings of the 2nd International Workshop, CNR, Rome, Italy, December 4–7, 2006*. British

Archaeological Reports, International Series 1568. Oxford: Archaeopress, pp. 107–112.
Schaber, G. G., and Gumerman, G. J., 1969. Infrared scanning images: an archaeological application. *Science*, 164(3880), 712–713.
Sever, T. L., 1998. Validating prehistoric and current social phe- nomena upon the landscape of the Peten, Guatemala. In Liverman, D. M., Moran, E. F., Rindfuss, R. R., and Stern,
P. C. (eds.), *People and Pixels: Linking Remote Sensing and Social Science*. Washington, DC: National Academy Press, pp. 145–163.
Shaw, R., and Corns, A., 2011. High resolution LiDAR specifically for archaeology: are we fully exploiting this valuable resource? In Cowley, D. C. (ed.), *Remote Sensing for Archaeological Heritage Management: Proceedings of the 11th EAC Heritage Management Symposium, Reykjav´ık, Iceland, 25–27 March 2010*. EAC Occasional Paper 5. Brussel: Europae Archaeologiae Consilium, pp. 77–86.
Sheets, P., and Sever, T. L., 1991. Prehistoric footpaths in Costa Rica: transportation and communication in a tropical rainforest. In Trombold, C. D. (ed.), *Ancient Road Networks and Settlement Hierarchies in the New World*. Cambridge: Cambridge Univer- sity Press, pp. 53–65.
Shell, C. A., 2002. Airborne high-resolution digital, visible, infrared and thermal sensing for archaeology. In Bewley, R. H., and Rączkowski, W. (eds.), *Aerial Archaeology: Developing Future Practice*. Amsterdam: IOS Press. NATO Science Series I, Life and Behavioural Sciences, Vol. 337, pp. 181–195.
Shell, C. A., 2005. Digital airborne remote sensing: high-resolution digital airborne survey for archaeological research and cultural landscape management. In Musson, C., Palmer, R., and Campana, S. (eds.), *Volo nel Passato: Aerofotografia e cartografia archeologica*. Florence: All'Insegna del Giglio, pp. 271–283.

Shennan, I., and Donoghue, D. N. M., 1992. Remote sensing in archaeological research. In Pollard, A. M. (ed.), *New Develop- ment in Archaeological Science: A Joint Symposium of the Royal Society and the British Academy February 1991*. Proceedings of the British Academy 77. Oxford: Oxford University Press, pp. 223–232.
Sittler, B., and Schellberg, S., 2006. The potential of LIDAR in assessing elements of cultural heritage hidden under forest or overgrown by vegetation: possibilities and limits in detecting microrelief structures for archaeological surveys. In Campana S., and Forte, M. (eds.), *From Space to Place. 2nd International Conference on Remote Sensing in Archaeology : Proceedings of the 2nd International Workshop, CNR, Rome, Italy, December 4–7, 2006*. British Archaeological Reports, International Series 1568. Oxford: Archaeopress, pp. 117–122.
Stolze, F., 1882. *Persepolis; Die achaemenidischen und sasanidischen Denkmäler und Inschriften von Persepolis, Istakhr, Pasargadae, Shâkpûr*. Berlin: Ahser.
Traviglia, A., 2007. MIVIS hyperspectral sensors for the detection and GIS supported interpretation of subsoil archaeological sites: An Italian case study. In Clark, J. T.,

and Hagemeister, E. M. (eds.), *Digital Discovery: Exploring New Frontiers in Human Heritage. CAA 2006. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology. Proceedings of the 34th Conference, Fargo, United States, April 2006*. Budapest: Archaeolingua, pp. 287–299.

Verhoeven, G. J. J., Loenders, J., Vermeulen, F., and Docter, R., 2009. Helikite aerial photography – a versatile means of unmanned, radio controlled, low-altitude aerial archaeology. *Archaeological Prospection*, 16(2), 125–138.

Weishampel, J. F., Chase, A. F., Chase, D. Z., Drake, J. B., Shrestha, R. L., Slatton, K. C., Awe, J. J., Hightower, J., and Angelo, J., 2010. Remote sensing of ancient Maya land use features at Caracol, Belize related to tropical rainforest structure. In Forte, M., Campana, S., and Liuzza, C. (eds.), *Space, Time, Place: Third International Conference on Remote Sensing in Archaeol- ogy, 17th–21st August 2009, Tiruchirappalli, Tamil, Nadu, India*. British Archaeological Reports, International Series 2118. Oxford: Archaeopress, pp. 45–52.

Wilson, D. R., 2000. *Air Photo Interpretation for Archaeologists*, 2nd edn. Stroud: Tempus.

Wiseman, J., and El-Baz, F., 2007. *Remote Sensing in Archaeology*. New York: Springer.

WEB References

Aerial Archaeology Research Group. http://www.univie.ac.at/aarg. International Society for Archaeological Prospection. http://www.brad.ac.uk/archsci/archprospection/.

Cross-references

Electrical Resistivity and Electromagnetism Field Survey
Geographical Information Systems (GIS)
Geomorphology
Geophysics
Ground-penetrating Radar
Landscape Archaeology
Magnetometry for Archaeology

ستيفانو كامبانا:



أستاذ بكلية الكلاسيكيات ومعهد ماكدونالد للبحوث الآثارية، جامعة كامبريدج، كامبريدج، المملكة المتحدة. والمؤلف في الأًصل يعمل في مختبر علم آثار المشهد العام الطبيعي الثقافي والاستشعار عن بعد، قسم التاريخ والتراث الثقافي، جامعة سيينا، إيطاليا.

ياسر مهدي:



كان "ياسر مهدي" يعمل في وزارة الآثار العراقية في مدينة إربيل، وقد تلقى دورة تدريبية على يد مؤلف هذا البحث، وسمح له ذلك بترجمة النص إلى اللغة العربية، غير أن المنية وافته بعد إتمام الترجمة وقبل أن يرى هذا البحث منشورا، ويهدي المؤلف هذا العمل إلى روحه. ويظهر ياسر مهدي في يسار الصورة المرفقة يتابع ما يسجله المؤلف خلال عملهما


بيت الجغرافيا
GEO-HOUSE
© 2019